



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor

Strojírenská technologie

Zaměření

Materiálové inženýrství

Katedra materiálů

Jan Kieslich

KMT – 246

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Daďourek – TU v Liberci

Konzultant:

Ing. Miroslav Kábrt – TL Ultralight

V Hradci Králové, 19. května 2009



Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálů

Zaměření: Materiálové inženýrství

Diplomant: Jan Kieslich

Číslo DP: KMT - 246

Vedoucí: Doc. Ing. Daďourek

Konzultant: Ing. Miroslav Kábrt

Hlavním cílem této práce je rozbor materiálů standardně používaných k výrobě pásnic pro ultralehká letadla a porovnání výhodnosti jejich použití vůči novým materiálům. Součástí rozboru je i popis technologie jejich výroby.

U vybraného okruhu materiálů byly hodnoceny jejich vlastnosti zejména z technologického a pevnostního hlediska, posouzena vhodnost pro dané použití, výrobní náklady a jejich dostupnost. Výsledky byly zpracovány formou vyhodnocení nejvhodnějších materiálů pro dané použití.

Klíčová slova: pásnice, pryskyřice, tkaniny, roving, prepreg, carbon, separátory, zkouška ohybem, konstrukce křídla, teorie kompozitů, trhací stroj



Annotation

The main aim of this work is analysis and comparison materials which are usually default used to production of flange for ultra - light airplanes, in the face of new materials, near which we will consider their merit of using for the future. Part of analysis is also description technology of production single materials.

In choice of materials were to be assessed their characteristics especially from technological and solidity aspects, fitness for given to using, prime cost and general availability. Result of analysis is the appreciation materials according to of all above - mentioned criteria and evaluation optimal variants for given to using in praxis.

Keywords: flange, resin, fabrics, roving, prepreg, carbon, separator, deflection test, wing structure, theory of composite, tension testing machine



Prohlášení

Byl (a) jsem seznámen (a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval (a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis



Poděkování

Chtěl bych poděkovat především Doc. Ing. Daďourkovi za vynikající spolupráci, materiály, podněty a připomínky a velikou ochotu, se kterou se věnoval mé diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavu Kábrtovi z firmy TL-Ultralight za poskytnutí všech potřebných informací a materiálů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili studium na této vysoké škole a jejich podporu po celou dobu mého studia.



Obsah

Úvod	9
Zdůvodnění aktuálnosti tématu.....	9
Formulace cílů a zdůvodnění.....	9
Předpoklady a omezení práce	9
Způsob dosažení cíle	10
Metody a techniky, které budou použity v diplomové práci	10
Předpokládaný vlastní přínos.....	11
Využití práce.....	11
Další náměty	11
Teoretická část	12
Obecná teorie kompozitních materiálů	12
Používané materiály a trendy rozvoje	17
Pryskyřice	17
Tkaniny	18
Konstrukce křídla.....	28
Prvky nosné konstrukce křídla.....	28
Jednonosníkové konstrukce.....	31
Experimentální část	35
Výroba formy.....	35
Příprava formy	35
Separace formy	38
Výroba zkušebních vzorků	39



1. Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300).....	40
2. Uhlíkový rovingy (TORAYCA SC 700).....	43
3. Prepreg.....	48
4. Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900).....	54
5. Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod).....	59
Zkouška ohybem.....	63
Typy ohybových zkoušek.....	64
ČSN EN ISO 178.....	65
Průběh zkoušky.....	67
Připravené vzorky.....	68
Trhací stroj.....	68
Naměřené a vypočtené hodnoty.....	72
Objemové a hmotnostní podíly složek kompozitu.....	76
Statistické zpracování dat.....	80
Grafické znázornění výsledných hodnot:.....	81
I - Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo).....	81
II - Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700).....	83
III – Prepreg.....	84
IV - Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900).....	86
V – Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod).....	87
Diskuze výsledků.....	89
Průměrná hodnota sady F , y , σ_0 , E	89
Směrodatná odchylka.....	90
Variační koeficient.....	90
Průměrná hodnota sady hmotnostního a objemového podílu.....	90



Směrodatná odchylka	91
Variační koeficient	91
Pevnostní, technologické, ekonomické hodnocení	91
Závěr	96
Přehled literatury a použitých zdrojů	97
Seznam obrázků	98
Seznam příloh	101
Příloha č. 1 - separátory	102
Příloha č. 2 - epoxidová pryskyřice MGS LR 285	103
Příloha č. 3 - tužidlo	105
Příloha č. 4- materiálové listy	106
Příloha č. 5 - makro řezy vzorků a lomů	111
Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300)	111
Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700)	113
Prepreg (HexPly M10)	115
Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)	117
Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)	120



Úvod

Zdůvodnění aktuálnosti tématu

V současné době je strojírensko letecký průmysl ve velmi složité situaci, kdy je z důvodů konkurenceschopnosti svých výrobků nucen snižovat výrobní náklady a zvyšovat kvalitu výrobků. Jednou z hlavních příčin je dovoz cenově srovnatelných substitučních výrobků ze zahraničí, jejichž kvalita je často na velmi vysoké úrovni. Z tohoto důvodu jsou výrobci neustále nuceni zvyšovat efektivitu své výroby, se kterou velmi úzce souvisí i vhodnost a celková dostupnost použitých materiálů.

Formulace cílů a zdůvodnění

Hlavním cílem této práce je vytvořit obecný přehled o oblasti výroby ultralehkých letadel, poskytnout čtenářům základní teoretické znalosti a seznámit je s provedeným porovnáním vybraných vzorků materiálů vhodných pro výrobu pásnic pro ultralehká letadla. Od těchto cílů se odvíjí i obsah práce, který je rozdělen do následujících tematických celků:

- Teoretická část
- Experimentální část (rozbor)

Teoretická část obsahuje obecné principy výroby pásnic pro ultralehká letadla, definice pojmů a charakteristiky používaných materiálů a konstrukcí křídla.

V experimentální části je provedeno porovnání vybraných materiálů používaných pro výrobu pásnic pro ultralehká letadla. Kritéria byla zvolena tak, aby umožnila dosažení objektivních výsledků umožňujících provedení výběru nejvhodnějších materiálů, nalezení možností optimalizace výroby z technologického a ekonomického hlediska. Do hodnocení byly zahrnuty i výsledky praktických zkoušek, experimentů a statistických výpočtů.

Předpoklady a omezení práce

Výsledky a technologické postupy uvedené v této práci jsou přínosné a využitelné v organizacích zabývajících se výrobou ultralehkých letadel. Díky přehledně uvedeným informacím je dosažena srozumitelnost pro nejširší okruh čtenářů.



Praktické využití práce je podmíněno především dostupností potřebných materiálů a výrobních postupů.

Určitým omezením je špatná dostupnost a vysoká cena jednoho z použitých materiálů- marského carbonu a finanční náročnost provedení zkoušky ohybem, která je v této práci použita.

Způsob dosažení cíle

K dosažení hlavního cíle bylo provedeno rozdělení problematiky do několika dílčích cílů a jejich následné shrnutí. Dílčí cíle korespondují s jednotlivými kapitolami uvedenými v obsahu tohoto dokumentu. V průběhu práce byla průběžně prováděna výroba vzorků a jednotlivá měření. Na základě získaných výsledků byly v některých případech prováděny menší úpravy v celkové struktuře práce. Její rozsah byl zvolen s ohledem na potřebnou úroveň detailnosti práce, časové možnosti, dostupnost materiálů, dostupnost zkoušek, finanční nákladnost a množství dostupných informací.

Tato diplomová práce byla řešena za laskavé spolupráce s firmou TL Ultralight s.r.o., která je významným výrobcem ultralehkých letadel nejen pro český trh.

Metody a techniky, které budou použity v diplomové práci

Pro jednotlivé části práce jsou použité rozdílné metody a techniky vyhodnocení informací.

V obecné teoretické části je využita především syntéza, pomocí které je provedeno spojení jednotlivých poznatků do souhrnného celku při současném sledování vzájemných vztahů a sounáležitostí mezi jednotlivými částmi. Tato metoda umožňuje poznat danou oblast hlouběji jako celek. V případě potřeby je syntéza doplněna i analýzou tak, aby se obě tyto metody vhodně doplňovaly.

V praktické experimentální části jsou použity statistické a numerické metody společně se samotnou výrobou vzorků a provedenými zkouškami.



Předpokládaný vlastní přínos

Hlavním přínosem této práce je provedení zkoušek, porovnání a vyhodnocení vybraných materiálů, které bylo zrealizováno z převážné většiny vlastními silami a se kterým souvisí i vlastnoruční výroba forem, zajištění materiálu a následná výroba vzorků.

Mezi další přínosy patří vyhledání informačních zdrojů, získání potřebných informací, jejich sumarizace, a následné vyvození potřebných závěrů tak, aby práce představovala komplexní pojetí dané problematiky a měla co nejvyšší informační hodnotu.

Práce je navíc doplněna o vlastní poznatky získané při působení ve firmě JKproduct, která se mimo jiné zabývá výrobou laminátů a laminátových výrobků.

Využití práce

Primární tematické zaměření práce je využití uvedených materiálů v oblasti výroby ultralevých letadel. Práce je vzhledem ke svému zaměření určena převážně pro pracovníky vývojových oddělení.

Další náměty

Tuto práci by bylo vhodné dále doplnit o rozbor ovlivnění pórovitosti vzorku různou úrovní standardností výrobního postupu včetně vlivu lidského faktoru.



Teoretická část

Obscená teorie kompozitních materiálů

V práci jsou použity následující základní pojmy.

Pod pojmem *kompozit* chápeme materiál složený minimálně ze dvou odlišných fází, z nich tzv. *matrice* slouží k uložení druhé většinou zpevňující fáze výztuže. Zpevňující fáze má v našich aplikacích tvar spojitých vláken a proto mají označení *vláknové kompozity*.

Vlákna výztuže rozhodují o tahové, ohybové a tvarové pevnosti kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňuje nejen materiál vláken (uhlík, sklo, aramid), ale i jejich procentuální obsah v matici a jejich orientace.

Vlákna jsou uspořádána buď jednosměrně (vzájemně rovnoběžně) ve formě rovingu nebo jednosměrné tkaniny (tkanina s převládajícími vlákny v jednom směru), nebo vícesměrně ve formě tkanin.

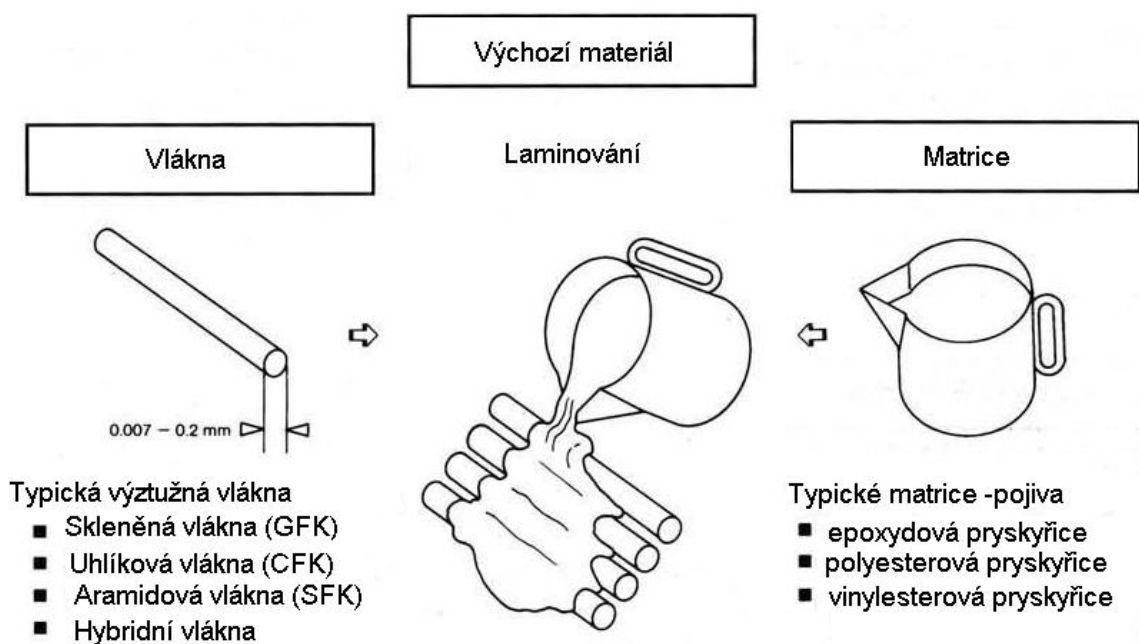
Pevnost a tuhost konkrétního materiálu se významně mění podle směru uložení vláken, nejvyšší je ve směru uložení, podstatně horší je v ostatních směrech.

Matrice kompozitního materiálu jsou většinou pryskyřice ze skupiny termoplastů. Nejčastěji se používají epoxidové pryskyřice, ale i polyestery a vinylestery.

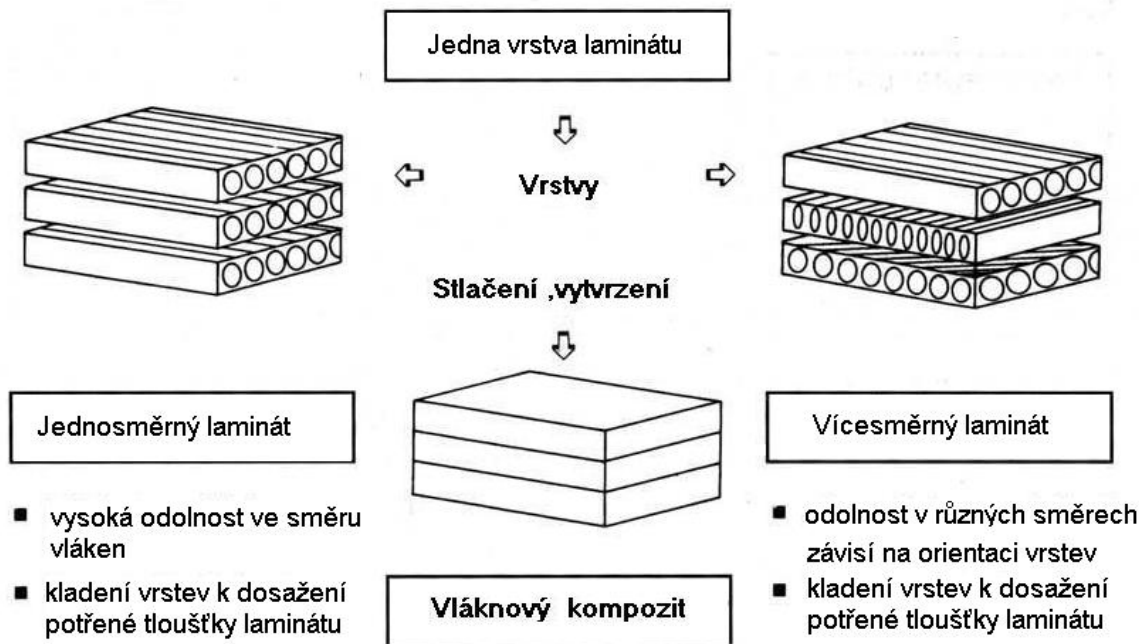
Pryskyřice váží vlákna a umožňují přenos zatížení mezi nimi. Tvoří také ochranu vláken a určují některé vlastnosti, jako je smršťivost při vytvrzování, chemická odolnost atd. Pryskyřice musí být dostatečně pružná, aby nedošlo při tahovém namáhání k jejímu porušení dříve, než k poruše vlákna.

Celkové vlastnosti kompozitu závisí na poměrném množství složek pryskyřice, tužidel a vláken. Vlastní laminát je vytvářen různými metodami. Pro oblast velkého leteckého průmyslu je typické použití vláken předem nasycených pryskyřicemi, tzv. prepregu, s kterých se vytváří výrobek vytvrzovaný poté pod tlakem v tzv. autoklávech. Pro oblast sportovního letectví je typická tzv. ruční laminace, které se budeme vzhledem k zaměření zprávy dále podrobně věnovat.

Vznik kompozitního materiálu ve výrobě ruční laminací je znázorněn na následujícím obrázku.

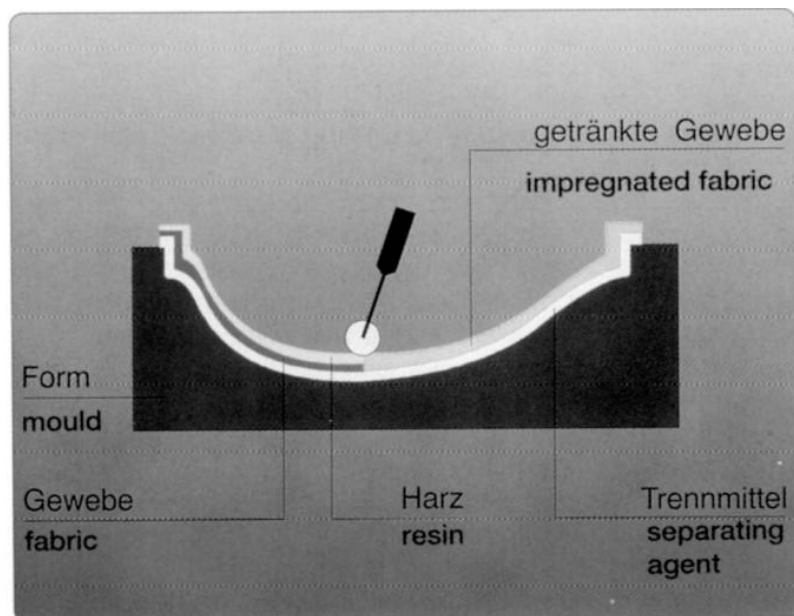


Obrázek 1- Výroba materiálu



Obrázek 2 – Výroba laminované vrstvy materiálu

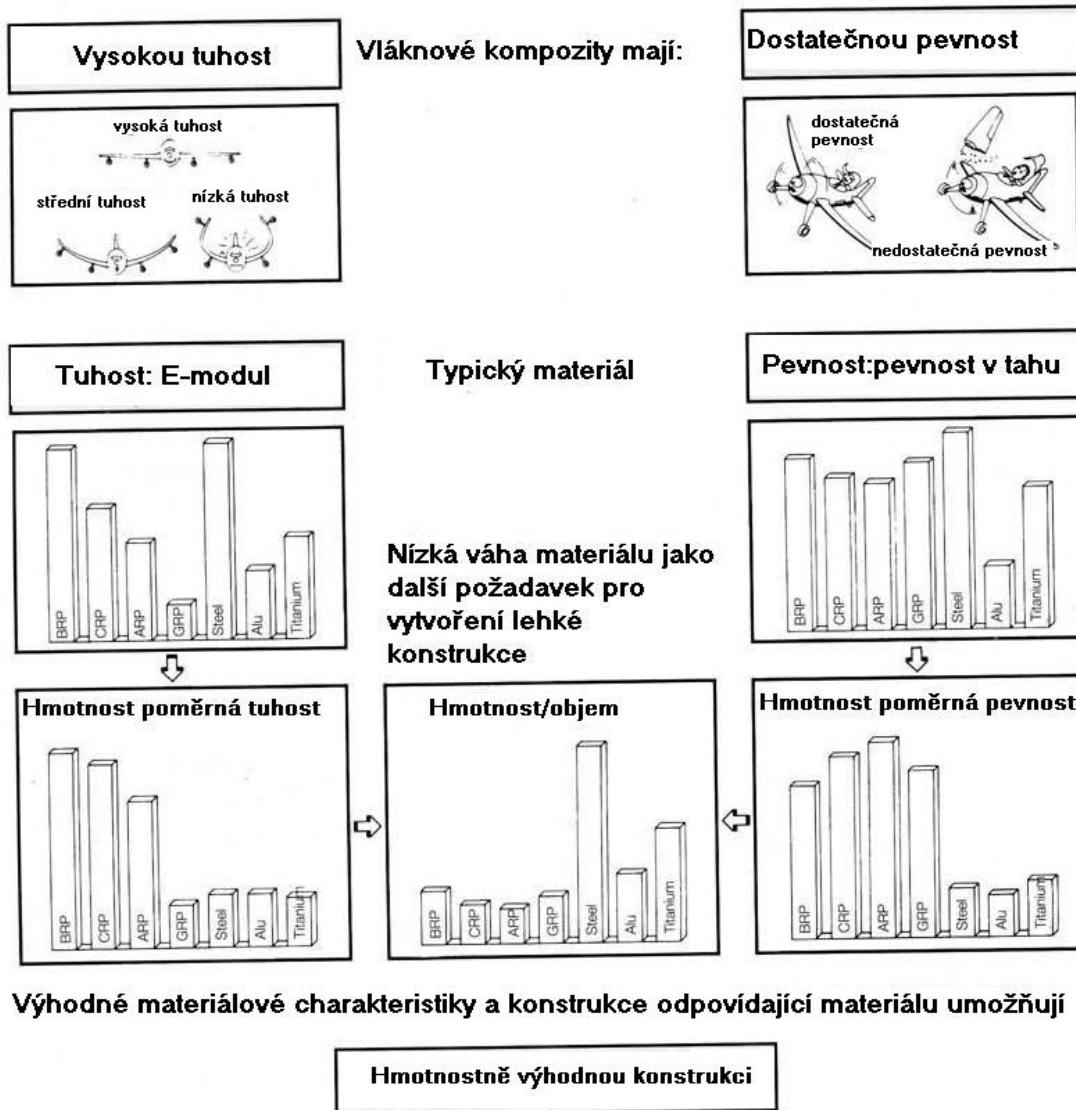
Ruční laminace probíhá většinou v negativních formách, kde je kladená tkanina prosycována pryskyřicí ručním válečkem. V případě použití sendviče je na laminát položena igelitová plachetka, pod kterou je vytvořen podtlak a sendvič je tak stlačen. Vznik laminátového výrobku je dokumentován následujícím obrázkem.



Obrázek 3- Ruční laminace

Důvody pro použití kompozitů v letectví vyplývají z navzájem protichůdných požadavků na samotnou konstrukci letadla, která musí být z hlediska výkonů a užitečného zatížení co nejlehčí a přitom dostatečně pevná a tuhá.

Výhody kompozitů nejlépe shrnuje známý obrázek uváděný v mnohých publikacích o kompozitech.



Obrázek 4 - Vlastnosti kompozitů

Výhody různých typů kompozitů jako materiálů jsou patrné, při nízké měrné hmotnosti poskytují vysokou pevnost materiálu pro stabilitu a tuhost konstrukce jsou důležité vysoké E-moduly.

Mezi další výhody kompozitu jako materiálu patří i následující:

- vysoká pevnost (200 až 680 MPa)
- pozvolný postup poruchy
- vysoká odolnost proti vibracím



- nízká hmotnost (měrná hmotnost 1800 kg/m^3)
- odolnost proti korozi a řadě chemikálií
- odolnost proti vysokým teplotám (až $925 \text{ }^\circ\text{C}$), požární odolnost, samozhášivost
- velmi nízká teplotní vodivost ($0,58 \text{ W/m.K}$) a nízká tepelná roztažnost ($8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)
- elektrická nevodivost, elektromagnetická transparentnost
- barevnost je dosažena při výrobě polotovaru, nevyžadují povrchovou úprav a údržbu

Hlavní důvody pro používání kompozitů nejsou ovšem pouze jejich skvělé materiálové charakteristiky, existují i další vysokopevnostní kovové materiály. Poměrně značné výhody oproti klasickým konstrukcím poskytují kompozity ve výrobním procesu.

Úsporné výrobní metody

- malé množství dílů
- méně odpadu z materiálu
- jednodušší výroba složitých tvarů

Minimalizuje se počet vyráběných dílů, které mohou být vyráběny ve velkých technologických celcích a tak se výrazně snižuje pracnost. Přímou při ukládání materiálu je možnost plynulého měnění tloušťek skořepiny, kterého se u klasických konstrukcí dosahuje pouze chemickým frézováním. Složité tvary povrchů s dvěma rovinami křivostí jsou mnohem snáze vyrobitelné s nesrovnatelnou kvalitou povrchu. Tyto technologické výhody bývají často výraznějším argumentem pro použití kompozitů, než jejich materiálové charakteristiky.

Pro objektivitu informací je nutné zmínit i nevýhody kompozitů. Konstrukce musí být pro použití kompozitů navržena, jejich dodatečné aplikace na jednotlivé díly nejsou většinou výhodné. Kompozity jsou při výrobním procesu velice náročné na technologickou kázeň (poměry matrice a výztuže, vytvrzování, manipulace



s prepregy, atd.), konečné vlastnosti materiálu jsou vytvářeny na rozdíl od kovových materiálů ve výrobním procesu. Vlastnosti kompozitů se mění s teplotou, má na ně vliv i okolní prostředí, což způsobuje složitější systém zkoušek při pevnostních průkazech. Přes tyto uváděné problémy současný rozmach kompozitových konstrukcí v letectví naznačuje, že jejich výhody jednoznačně převažují.

Používané materiály a trendy rozvoje

Používané materiály rozdělíme do následujících skupin:

- pryskyřice
- tkaniny
- rovingy
- pěny

Pryskyřice

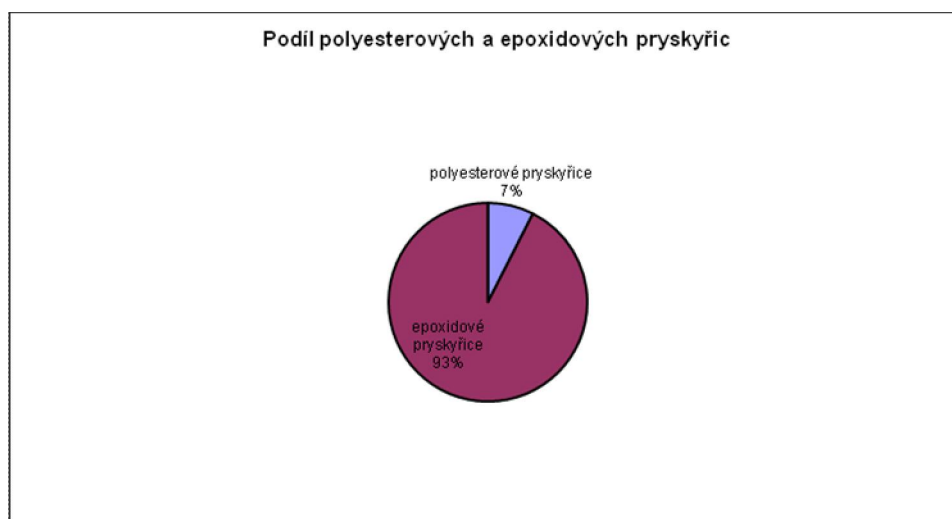
Přehled používaných pryskyřic je uveden v následující tabulce. Lze konstatovat, že standardem pro ruční laminaci v leteckých aplikacích je pryskyřice MGS L285, polyesterové pryskyřice se vyskytují v menší míře. Do budoucna je možno předpokládat naprostou převahu epoxidových pryskyřic nad polyesterovými, které mají jedinou podstatnou výhodu a to 5 až 6 krát nižší cenu. Nad touto výhodou převáží nevýhody polyesterových laminátů:

- nižší tvarová stálost
- křehkost a nižší houževnatost
- nižší kvalita spojů, daná parafínem, který se dostává na povrch laminátů, aby zabránil vypařování styrénu, současně však, pokud se neslaminovává čerstvý laminát vytváří separátor ovlivňující kvalitu spoje
- špatná opravitelnost

Vinylestery tvoří cenově i vlastnostmi přechod mezi polyesterem a epoxidy a nepředpokládáme jejich větší rozšíření v leteckých aplikacích.

Epoxidové	MGS L285, tvrdidla 285-287
Polyesterové	Palatal U541TV-03
	Norpol 440-M850
Vinylesterové	Atlac 585

V případě použití barvených laminátů je možno předpokládat používání pryskyřice Bakelite I20 SL s provozní teplotou do 110 stupňů.



Obrázek 5 – Podíl polyesterových a epoxidových pryskyřic

Tkaniny

V oblasti tkanin se používají výrobky firem Interglass, Hexcel, Porcher a Vertex. V poslední době se na trh snaží prorazit další česká firma Raymond s 160 g/m² tkaninou. Standardem se jeví tkaniny Interglass, které spolu s některými tkaninami Hexcel a Porcher jsou doporučeny pro letectví.

Skleněné tkaniny

Skleněná vlákna

Velmi často se používají především v kompozitech s plastovou maticí.

Vlastnosti:

- Hustota okolo $2,5 \text{ g/cm}^3$
- Tuhost zhruba jako hliník - $1/3$ tuhosti oceli
- Malá odolnost skleněných vláken v únavě
- Tepelná vodivost je o polovinu nižší než u oceli
- Tepelná roztažnost je méně než polovina tepelné roztažnosti oceli

V současné době se používají pouze skleněné tkaniny.

Interglass sklo

Typ	gramáž	vazba
[]	$[\text{g/m}^2]$	[]
92110	163	kepr
92125	280	kepr
92140	390	kepr
92145	220	Jednosměr

Hexcel sklo

Typ	gramáž	Vazba
[]	$[\text{g/m}^2]$	[]
1039	162	Kepr
1102	300	Kepr

Porsche sklo

Typ	gramáž	vazba
[]	$[\text{g/m}^2]$	[]
917	163	kepr
363	280	kepr



Vertex sklo

Typ	gramáž	vazba
[]	[g/m ²]	[]
V355	355	plátno

Uhlíkové tkaniny

Zaznamenaný trend ve vývoji malých letadel vedoucí na rychlejší stroje s vyšším zatížením při striktním požadavku na stále snižování váhy způsobí používání uhlíkových tkanin. Z hlediska pevnostních požadavků a cenové výhodnosti budou používány následující gramáže.

Uhlíková vlákna

Uhlík byl znám jako látka již v pravěku (dřevěné uhlí, saze), ale jako prvek je znám až od druhé poloviny osmnáctého století. Mezinárodní název uhlíku “carbon” je odvozen od latinského carbo, čímž Římané označovali dřevěné uhlí. Elementární uhlík byl dokázán ve vesmíru: Na Slunci, hvězdách, kometách a v atmosféře planet.

Vlastnosti uhlíkových vláken:

- mají asi desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu proti skleněným vláknům
- prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken
- hustota okolo 1,8 - 2 g/cm³

Zatímco člověk se snaží o zhotovení uhlíkových vláken zhruba 120 let, příroda je uměla vytvořit již v dávných geologických časech. Mineralogové zjistili v některých ložiskách grafitu výskyt vláknitých a tubulárních krystalitů. Ještě zajímavější jsou nálezy vláknitých keritů v dutinách morionů žulových ložisek na Ukrajině.

Oficiálně je za otce uhlíkových vláken považován Edison, neboť v roce 1879 zveřejnil svůj vynález žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem. První vědecké pojednání zahrnující vláknité formy uhlíku se objevuje v roce 1890. O půl století později byla vypěstována vlákna rozkladem metanu, propanu a etylenu při



1200 °C na křemenných podložkách krátce poté byla získána zkroucená vlákna délek v jednotkách milimetrů na vyzdívce vysokých pecí pro výrobu železa. Současně probíhaly pokusy o pyrolýzu viskózních vláken, které vyvrcholily tím, že firma Union Carbide Corporation zavedla na trh kontinuální vlákna pod označením Thornel 25. Práce na využití pyrolýzy plynů pokročily k využití vyšších uhlovodíků. Již při 1000 °C se podařilo rozkladem n-heptanu v křemenné trubici připravit širokou paletu vláken s délkami do 5 cm a průměrem do 200 μm.

Počátek šedesátých let zaznamenává úspěšné pokusy o karbonizaci dalších organických vláken. Nejlepším prekurzorem se jeví vlákna polyakrylonitrilová. Vlivem napětí při teplotách nad 2000 °C se zlepšily mechanické vlastnosti vláken z viskózního prekurzoru – Thornely 40, 50, 75 a 100 mají pevnost v tahu i modul pružnosti vhodný pro vyztužování polymerů a kovů. Nezávisle na japonských pracích využívá skupina v Royal Air Force ve Farnborough UK polyakrylonitril stabilizovaný oxidačním způsobem a dosahuje nečekaně vynikajících mechanických vlastností. Počátek sedmdesátých let znamená nástup uhlíkových vláken z isotropních smol. Následovaly experimenty na vylepšování kvality PAN prekurzoru se současným růstem mechanické pevnosti vláken a počátky uplatnění mezofázových smol. Uhlíková vlákna z par, díky rozpracování katalytických vlivů přechodných kovů, obzvláště železa na kvalitu růstu vláken, postupně přecházely do průmyslových objemů. Po objevu fullerenu přicházejí na svět uhlíkové nanotrubičky a vzniká tak plynulý přechod od kontinuálních uhlíkových vláken až po vlákna v nanopodobě. Technologický vývoj v oblasti uhlíkových vláken pokračuje neustále dál k vyšším mechanickým parametrům a k jejich lepšímu využití.

Uhlíková vlákna jako technický materiál jsou tedy známa zhruba 50 let. Postupně byly vyvíjeny nové typy vláken se speciálními vlastnostmi, tak původní materiál sloužící pouze pro vysokoteplotní izolace získával stále vyšší pevnost, modul pružnosti, elektrickou a tepelnou vodivost respektive adsorpční vlastnosti. V současné době je třeba rozlišovat

– *uhlíková vlákna nižších parametrů* - pevnost v tahu < 1000 MPa, modul pružnosti v tahu < 100 GPa. Tato vlákna jsou obvykle připravována přímo ve formě textilních útvarů - tkanin, pásků, apod. Používají se jako tepelná izolace,



elektromagnetické stínění, odstraňování elektrostatických nábojů v povrchových vrstvách kompozitních struktur.

– **uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry** (high performance carbon fibers) - pevnost v tahu 3,5 - 7 GPa, modul pružnosti 230 - 930 GPa. Do této skupiny zahrnujeme vlákna připravená z polyakrylonitrilové suroviny, z mezofázových smol a vlákna charakteru whiskerů připravených katalytickým rozkladem plynných uhlovodíků (VGCF – vapor grown CF). Podle konkrétních mechanických vlastností je tato skupina dále členěna na vysocepevná vlákna (high tensile or high tenacity – HT fibers), vysokomodulová vlákna označená HM, středně modulová vlákna (intermediate modulus – IM fibers) a vlákna se supervysokým modulem (ultrahigh modulus – UHM fibers).

Standardní uhlíková vlákna mají pevnost v tahu mezi 3 až 4 GPa, modul pružnosti 230-300 GPa (typická vlákna mají označení T300 od firmy Toray), Nové typy těchto vláken mají obdobný modul pružnosti, ale pevnost značně vyšší (firma Toray typy T800 a T1000).

IM vlákna mají pevnost nad 4 GPa a modul pružnosti nad 290 GPa (M30SC fy Toray, IM 8 fy Hexcel, IMS fy Tenax a MR nebo MS fy Pyrofil).

Cena uhlíkových vláken závisí nejen na jejich parametrech, ale také na počtu monofilů v kablících.

– **aktivní uhlíková vlákna** s adsorpčními schopnostmi a měrným povrchem řádově $10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. Jsou připravována z viskózy, polyakrylonitrilu, poly-meta-aramidů, izotropních smol a dalších polymerních vláken. Využívají se pro čištění plynů a kapalin sorpcí.

– **jedno- i vícevrstvé útvary uhlíkových nanotrubic** - nejmodernější uhlíkový materiál rozměrově připomínající uhlíková vlákna, s prakticky teoretickými hodnotami mechanických vlastností (E-modul se blíží teoretickému modulu, vyplývajícímu z energie vazby mezi uhlíky, tedy 1 TPa, pevnost v tahu je předpokládána až 200 GPa). Mají schopnost zachycovat velké objemy plynů, iontů, vyztužovat polymerní vlákna a sloužit jako základní materiál v nanotechnologiích.



Pro výrobu konstrukčních materiálů ve formě kompozitů s polymerními, keramickými a dalšími matricemi jsou využívána mechanicky odolná vlákna krátkých rozměrů (pro izotropní výztuže), kontinuální rovnoběžně uspořádané kablíky s řádově tisícovkami (3, 6, 12, 24) monofilů. Jako textilní útvary jsou dodávány tkaniny, hybridní tkaniny se skleněnými nebo poly-para-aramidovými vlákny. Speciální tkaniny mající přednostní orientaci vláken, jsou vyráběna jako non-crimp tkaniny, 3D integrální profily, pásy a proplety (Siltex a Eurocarbon). V poslední době se rozšiřuje též využití netkaných textilií (Advanced Fiber Nonwovens – Hollingsworth & Vose Europe NV, Lantor NV).

Technologie výroby kompozitních výrobků z uhlíkových vláken a pojiv je velmi široká. Pro náročné výrobky jsou využívány technologie zajišťující směrové uspořádání vyztužujících vláken - jedná se tedy o pultruzi, dále o lisování předimpregnovaných pásů – prepregů (SMC), tlakové prosycování výztuže předtvarované práškovou technologií - RTM, nebo navíjením. Nejnovější technologie využívají pojiva v tenkých fóliích, z nichž prosycují předem uspořádanou výztuž za vakua (film infusion processes). Tam, kde je požadováno izotropní uspořádání výztuže je využíváno injekční vstřikování termoplastických pojiv.

Stále ještě poměrně vysoká cena uhlíkových vláken směřuje jejich aplikace na obory, v nichž tento handicap tolik neškodí.

Letectví a kosmonautika byly první, kdo dal impuls k vývoji těchto materiálů: konstrukce satelitů vesmírných lodí, konstrukční prvky draků letadel, výztuhy, pohyblivé části, palubní mechanismy, potahy, sedačky, trysky raket, lopatky motorů, vrtule, tlakové nádoby na palivo, radarová technika a další.

Pozemní doprava: cenové relace jsou méně příznivé pro širokou aplikaci, přesto jsou stavěny karoserie a výztuhy závodních automobilů, listy per, tyče náhonů, ojnice, pístní čepy, součásti brzd a brzdového obložení, těsnící součásti a obdobně.

Vodní doprava: byla zjištěna výborná odolnost uhlíkových kompozitů vůči mořské vodě, proto jsou výhodné výztuhy, žebra, stožáry a další prvky stavby lodí nákladních, dopravních a sportovních.



Strojírenství: podle předpovědí by mělo mít největší nárůst spotřeby po roce 2000; projektují se rychle rotující součásti, součástky s vratným pohybem, textilní stroje, kompresory, odstředivky, paže robotů, měrky a standardy pro opracování, kluzné součásti, ozubená kola, ložiska atp.

Výroba energie: turbíny a listy větrných elektráren, sběrače elektrického proudu, nosiče solárních článků, speciální baterie a články, elektrody, stínění elektromagnetického pole, tepelné stínění.

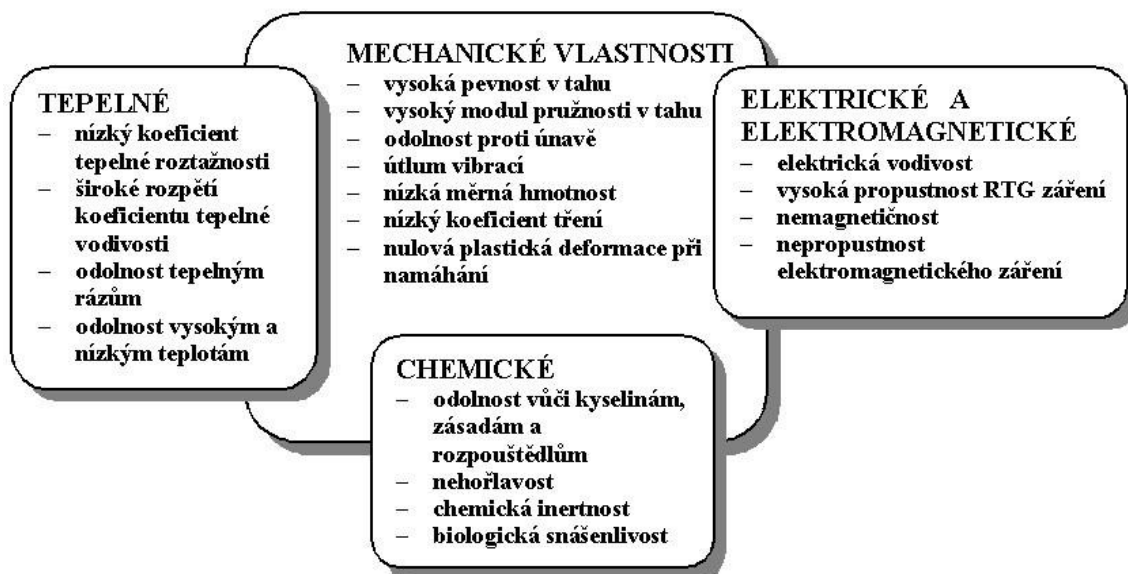
Lékařské použití: byla zjištěna vynikající biologická snášenlivost živé tkáně s uhlíkovými vlákny, proto jsou používány umělé kosti, šlachy, protetika; je známa vynikající propustnost rentgenových paprsků, proto se staví rentgenová lůžka, rentgenové tomografy, speciální snímací elektrody a další lékařské přístroje.

Chemické výroby: korozivzdorné nádoby, tanky, těsnění, trubky, možnost ohřevu korozivních médií, odstraňování statické elektřiny ze sklolaminátových konstrukcí, nádob a potrubí, korozivzdorná tepelná izolace, filtry atp.

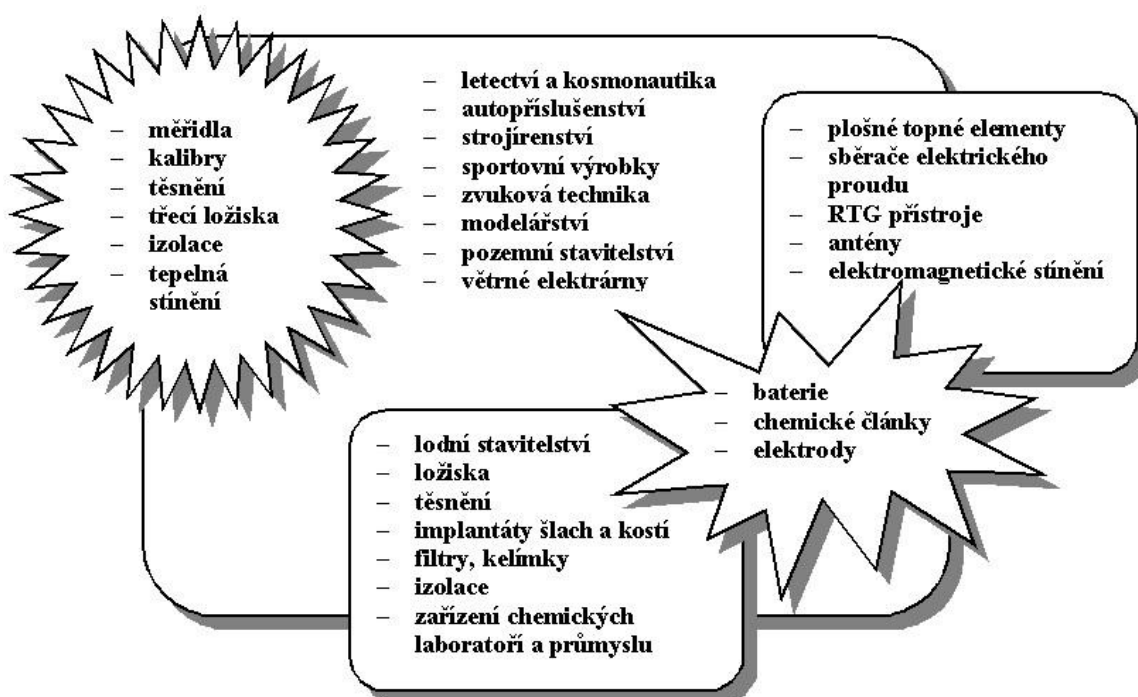
Spotřební průmysl - sportovní výrobky: tenisové rakety, badmintonové rakety, stolnětenisové pátky, rybářské pruty, golfové hole, výztuhy pádel a vesel, lyže, lyžařské hole, kostry závodních kol, výztuhy hokejek, modelářství; zvuková technika: hudební nástroje, gramofonová technika, antény...

Stavebnictví: antistatické podlahoviny, v Japonsku byly tyto materiály využity pro stavbu mostů a byl postaven 37podlažní dům z betonu vyztuženého cca 4% uhlíkových vláken při značné úspoře stavebních hmot.

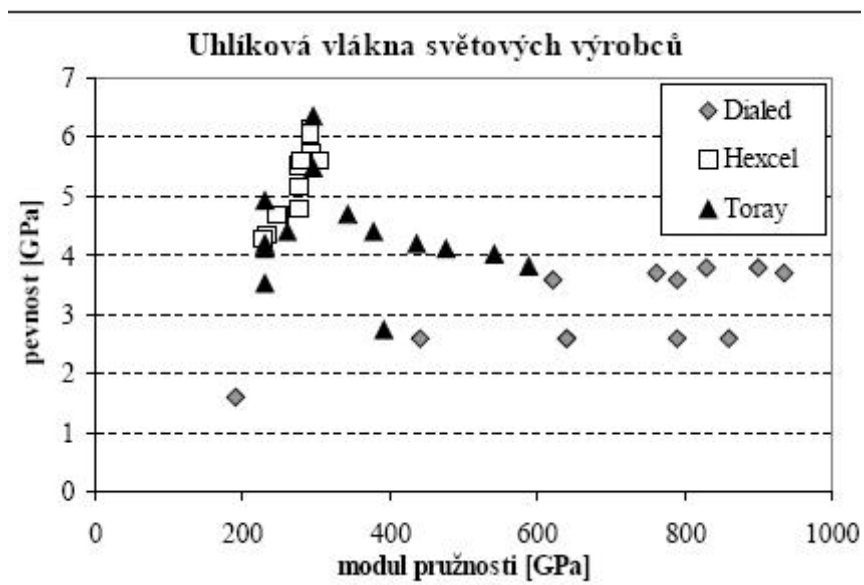
Filosofie nejvíce expandující firmy Zoltek předpokládá využití uhlíkových vláken pro opravy mostních konstrukcí, využití uhlíkových nanotrubic nabízí další nové možnosti aplikací.



Obrázek 6- Souhrn vlastností užitných uhlíkových vláken a kompozitů



Obrázek 7- Aplikace uhlíkových vláken a kompozitů



Obrázek 8- Pevnost a modul pružnosti uhlíkových vláken světových výrobců

Hexcel uhlík

Typ	gramáž	vazba
[]	[g/m ²]	[]
43200	200	kepr
G0814/43193	192	plátno
43162	160	kepr

Porsche uhlík

Typ	gramáž	vazba
[]	[g/m ²]	[]
3692	200	kepr
3257	195	kepr
3750	160	plátno

Další požadavky na bezpečnost posádky v nárazu vede použití hybridních tkanin, především kombinace uhlík kevlar.

Hexcel hybrid uhlík kevlar

Typ	gramáž	vazba
[]	[g/m ²]	[]
73210	210	kepr

Porsche hybrid uhlík kevlar

Typ	gramáž	vazba
[]	[g/m ²]	[]
3677	210	kepr
3785	180	plátno
3210	165	plátno

Výše uváděné uhlíkové a hybridní tkaniny jsou již navrženy pro použití na posledních prototypch.

Roving

Rovingy se používají na pásnice křídel, v současné době se používají skleněné i uhlíkové, do budoucna je možno předpokládat převážení pouze uhlíkových pásnic díky tlaku na snižování váhy a u větroňů požadavky na ohybovou tuhost křídla.

Uhlík	TORAYCA700S
Sklo	Vetrotex EC9-756-K43(68)

Pěny

V oblasti pěn pro sendviče se používají pěny firem Airex a Divinycell o hustotě 50-75 kg/m³. Můžeme se setkat i s použitím běžných polystyrénů na žebra a výplně ne a se stavebními pěny. Do budoucna je možno předpokládat, že se objeví na některé pevnostní díly pěny ROHACELL. Projevují se i náznaky používání nomexových voštin.



Airex	C70.55,C70.75
Divinycell	H60,HT55

Konstrukce křídla

Letecký průmysl je vedle kosmické techniky a atomové energetiky jeden z technologicky nejnáročnějších strojírenských oborů. Vyžaduje špičkové organizační schopnosti, odborné vědomosti a kvalifikované řízení.

Z hlediska konstrukce se křídlo skládá z nosné konstrukce, na ní zavěšených kormidel (křidélek), mechanizace a z částí systémů umístěných v křídle (podvozku, řízení, palivového systému atd.).

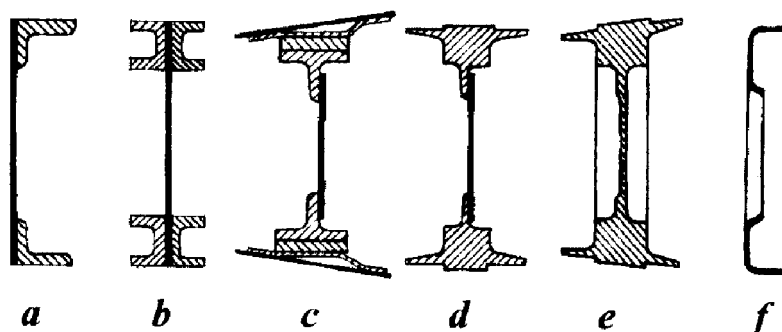
Prvky nosné konstrukce křídla

Nosnou konstrukci křídla tvoří systém podélných a příčných nosných elementů a potah.

Podélný systém

K podélnému systému přenosu sil patří nosníky, pomocné nosníky (podélné stěny) a podélníky (stringery).

Nosníky mají u kořene křídla mohutnou tahovou (vespod) a tlakovou (nahore) pásnici, přenášející ohyb křídla, nebo jeho převážnou část. U nosníků skládaných ze standardních lisovaných profilů je problém přizpůsobení pásnic obrysu profilu. Jednou z možností je vložit mezi pásnici a potah plechovou vložku s přírubami tvarově přizpůsobenými po délce proměnnému obrysu profilů, nebo přistehovat na pásnice nenosný (přerušovaný) pásek z nějakého lehkého obrobitelného materiálu (např. elektronového typu), dopilovat ho do tvaru profilu a nýtovat na přírubu pásnice spolu s potahem.

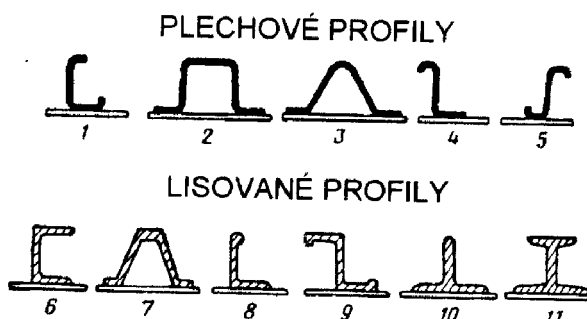


Obrázek 9- Typy používaných pásnic

Toto představuje mnoho drahé ruční práce. Proto se u větších sérií vyplácí vyrábět pásnice ze speciálních polotovarů obrobením (na kopírovacích nebo na NC strojích) přímo do tvaru profilů. U současných monolitních nosníků (pásnice i stojina z jednoho kusu), vyráběných z plochých tyčí nebo tlustých plechů ani není jiný postup možný.

Protože ohybový moment směrem od trupu rychle klesá, je nutno navrhnout způsob plynulého ubírání těžkých pásnic podél rozpětí. Vnější část nosníků s obráběnými pásnicemi nebo monolitní nosníky je u menších letadel běžně nahrazována pouze pomocným nosníkem (podélnou stěnou), nebo vymizí úplně – k přenosu ohybu i krutu stačí žebry podepřený potah.

Pomocné nosníky (podélné stěny) nepřenášejí ohyb vůbec, nebo jen malou část. Slouží jako opory žebířů a obrysových výztuh, uzavírají krut přenášející komory (přenášejí jejich smykové toky), utěšňují vnitřní prostory křídla, zvláště integrálních nádrží, podepírají potahy a vzadu často slouží i k připojení podpor částí řízení a mechanizace křídla.

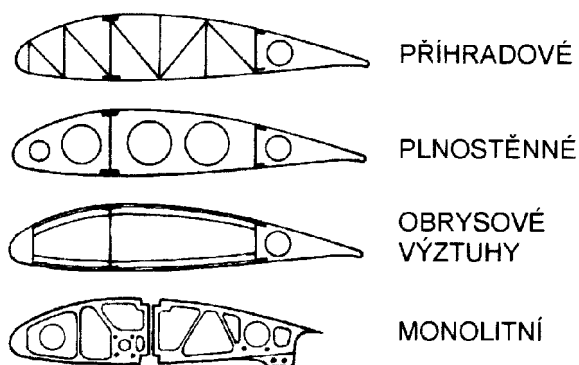


Obrázek 10- Podélníky

Podélníky (stringery) slouží především k přenosu vzdušných zatížení z potahu do žeber, podílí se (se spolunosnou šířkou potahu) na přenosu ohybového zatížení, zvyšují stabilitu potahu tím, že rozdělují velká pole mezi nosníky na menší a brání vzniku hlubokých a dlouhých vln od smykových toků. Tím přispívají i k aerodynamické čistotě obrysu křídla za letu. Pro velmi lehká letadla se používají i plechové profily, vyráběné protahováním plechových pásků průvlaky, nebo lisované profily, nabízené všemi hutěmi, které vyrábí letecké materiály, v nepřeberném množství variant a rozměrů.

Příčný systém

Příčný systém tvoří žebra a obrysové výztuhy. Obojí slouží především jako obrysotvorné elementy k podpoře potahu a udržení tvaru křídla za letu. Z hlediska přenosu zatížení slouží k přenosu zatížení z podélníků a přilehlých polí potahu na nosníky.



Obrázek 11- Příčný řez křídlem

Příhradová konstrukce žeber se – ve své čisté formě – dosud používá u velmi lehkých letadel. V kombinaci s obrysovémi výztuhami však může vycházet váhově příznivě.

Nejběžnější jsou *plnostěnná žebra*, lisovaná z plechu. U lehčích letadel se plnostěnná žebra kladou do míst, ve kterých se do nosné konstrukce křídla zavádějí osamělé síly (uložení podvozku, závěsy klapky, atd.) a mezi nimi je potah podepírán jen *obrysovémi výztuhami*. U klasicky koncipovaných křídel je běžná rozteč žeber a



obrysových výztuh (podle hustoty podélného systému cca 120 mm (bez stringerů) ÷ 350 mm.

Jednonosníkové konstrukce.

Křídlo je prakticky vždy řešeno jako jednonosníkové se sendvičovým potahem umožňující dosažení dokonalého tvaru povrchu a tím i vysoké výkony. Potah křídla tvořený pouze laminátovou skořepinou se prakticky nepoužívá. Na potah jsou použity zatím většinou skleněná tkaniny kladené pod 45 stupni. Používá se i kladení jednosměrných tkanin pod 45 stupni. V tomto případě musí být použity alespoň dvě vrstvy pootočené o 90 stupňů. U extrémně zatížených konstrukcí, jako jsou třeba akrobatické letouny, jsou potahy vytvořeny s uhlíkových tkanin. Tyto tkaniny se stále častěji začínají používat i letounů nižší kategorie. Jádru sendvičového potahu je většinou tvořeno pěnou, přes vyšší technologickou náročnost opět vidíme nárůst konstrukcí s voštinovým jádrem.

Nosník s I nebo C profilu má skleněné nebo uhlíkové pásnice a sendvičovou stojinu. Převahu má použití uhlíkových pásnic, jejich použití na letounech kategorie UL, přináší váhové úspory v řádu 5 kg. Pásnice jsou většinou umístěny až pod sendvičovým potahem, i když tím ztrácíme stavební výšku, zamezujeme postupnému vystupování pásnic skrz potah při stárnutí letounu a tak jeho aerodynamickému znehodnocování.

Podle toho, zda se jedná o amatérskou výrobu ze stavebnice, nebo se počítá pouze s dodávkami celých křídel, obsahuje nebo neobsahuje křídlo žebra. V křídle pro amatérskou výrobu umožňují žebra při stažení potahu jej fixovat ve správném tvaru, jejich význam je tedy především technologický, nikoli primárně pevnostní. Zmenšují ovšem i pole potahu a je možno použít i nižší stavební výšky sendviče např. 4 mm oproti běžně používaným 8 mm. Typickými příklady takovýchto křídel určených pro amatérskou stavbu ze stavebnice jsou křídla letounů Fascination nebo Lancair.

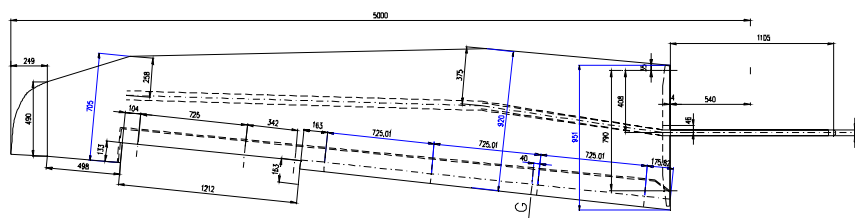


Obrázek 12 - kostra křídla letounu Fascination

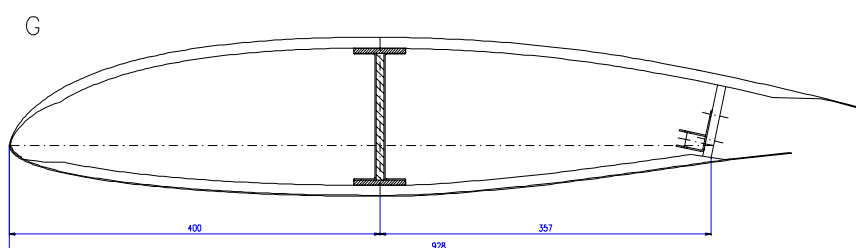


Obrázek 13- kostra křídla letounu Lancair

V současné době ovšem i u amatérských staveb převládá trend tzv. rychlostavebnic kdy výrobce dodává staviteli křídlo jako celek a tak se tento způsob výroby křídla stále více nahrazuje křídly bez jakýchkoliv žeber, které původně vznikly pro větroně.



G



A man in a light-colored shirt and dark trousers is working on a long, narrow boat hull in a workshop. The hull is supported by a wooden frame and is covered with a light-colored material, possibly fiberglass or plastic. The workshop has large windows in the background, and other boat hulls are visible in the distance.

33

Na obrázku viditelné žebra slouží pouze k vymezení prostoru integrálních nádrží ve křídle.

Jako určitou zajímavost je možno uvést výrobu tohoto typu křídla za použití 3D tkanin vytvářející sendvičový potah křídla. Na obrázku jsou vidět deformace, které vzorek s tímto potahem přenesl bez poruchy.



Obrázek 17 - Vzorek křídla s potahem s 3D tkanin při maximálním zatížení



Experimentální část

V této části je provedeno srovnání vybraných materiálů používaných pro výrobu pásnic pro ultralehká letadla. Pro experiment jsou použity jak materiály v současné době standardně používané, tak materiály nové, zatím v praxi ne příliš rozšířené.

Porovnání materiálů je realizováno na základě provedených zkoušek podle několika různých kritérií především z hlediska pevnostního a ekonomického. Součástí vyhodnocení porovnání je také návrh možností optimalizace výroby jak z technologického, tak ekonomického hlediska.

Experimentální část je rozdělena na následující části:

- Výroba formy
- Výroba zkušebních vzorků
- Zkouška ohybem
- Výpočty
- Diskuze výsledků

Výroba formy

Příprava formy

Pro výrobu potřebných vzorků je nejprve nutné vyrobít formu odpovídající cílovým rozměrům jednotlivých vzorků. Dle certifikovaných norem byl zvolen vzorek o rozměru 500x20x5 mm.

Forma určená pro výrobu těchto zkušebních vzorků se skládala ze dvou leštěných nerezových desek o rozměrech 500x500 mm a tloušťky 5 mm (viz obr. 18). Tento materiál byl použit místo plastové formy úmyslně, zejména z důvodu vysokých teplot vypékání zkušebních vzorků materiálu.



Obrázek 18 - desky použité na výrobu formy

K těmto deskám bylo použito 11 kusů hliníkových tyčí o rozměru 500x20 mm a tloušťky 5 mm, které byly nařezány z 6 m tyčí. Vzhledem k měkkosti materiálu je potřeba být u řezání velmi obezřetný, aby nedošlo k tvarové deformaci materiálů.



Obrázek 19 - hliníkové tyče

V další fázi bylo těchto 11 tyčí rozměřeno na 5 stejných úseků, v jejichž předělech byly vyvrtány díry pro šrouby. Při předvrtávání děr bylo nutné použití chlazení olejem. U spodní desky bylo navíc potřeba v připravených dírách vyvrtat i závit.



Obrázek 20 - rozměření tyčí před vrtáním

Následně bylo sešroubováno 11 ks připravených tyčí se základní deskou a vyvrtáno 9 děr pro středící šrouby za účelem smontování formy jako celku. U těchto děr byl opět vyříznut závit a použity středící šrouby, které byly pro větší pevnost spoje ještě zafixovány lepidlem. Poté byla přiklopena horní deska, která sloužila pro doformování vzorku. V této části bylo nutné také vyvrtat 9 děr (bez závitu) pro středící šrouby ve stejném umístění jako v předchozím případě. Na závěr byla celá forma za pomoci 9 matek stlačena a sešroubována.

Separace formy

Separaci formy jsem prováděl vždy v 5 až 6 opakováních separátorem od firmy Búfa s názvem Oldopal-Trennpaste produkt-cod 741-0054 (viz. příloha).

Jeden úkon separace se skládal z následujících činností:

- Řádné vymazání vnitřku formy pomocí hadru s optimálním nánosem separátoru.
- Zhruba 10 minutové zavadnutí separátoru.
- Setření čistým hadrem.

Celý úkon separace byl proveden v 5 až 6 opakováních. Pro případ lehké lokální opravy separované formy se používal separátor od firmy Loctite názvu Frekote a produkt-cod 770-NC (viz. příloha).



Obrázek 21 - Proces separace separátorem Búfa - Oldopal-Trennpaste



Obrázek 22 - Příprava formy před výrobou každého vzorku

Výroba zkušebních vzorků

Při výrobě všech vzorků byla teplota okolního vzduchu $T = 20^{\circ}\text{C}$ (místnosti s klimatizací). Pro výrobu vzorku byla vedle jednotlivých materiálů použita epoxidová pryskyřice typu EPIKOTE Resin MGS LR 285. Jedná se o nejčastěji používaný typ pryskyřice ve výrobě ultralehkých letadel. Jako tužidlo bylo použito EPIKURE Curing Agent MGS LH 287.

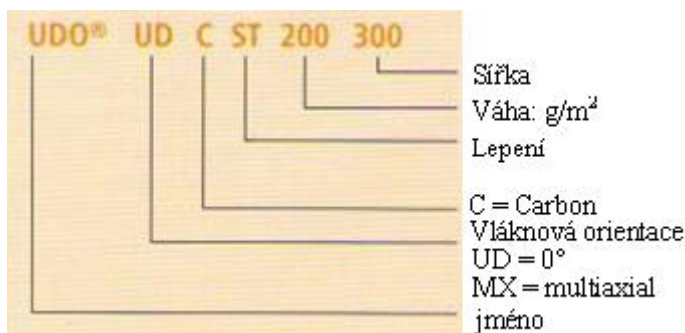
Materiálové specifikace u jednotlivých zkušebních materiálů jsou obsaženy v materiálových listech v příloze. Vytvrzení vzorků proběhlo uměle při teplotě od 60 do 120 stupňů Celsia v závislosti na použitém materiálu. Testování vyrobených vzorků proběhlo do 1 týdne od výroby. U vzorků byla zajištěna rovnoběžnost vláken v přepjatém stavu. Výroba probíhala plně manuálně tak, aby korespondovala s reálným procesem výroby a zároveň zohledňovala i lidský faktor.

1. Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300)

Tento materiál byl dodán od německé firmy Epo gmbh (www.epo-gmbh.de), která se specializuje na pokročilé materiály a technologie.

Materiál:

- materiál mě byl dodán v roli šíře 300 mm a délce 50 m viz obr.
- číslo role: F2931/75
- Produkt cod: 741-0054
- Typový název: UDO UD CS 200/300
- Délková hustota: 800 – 3600 tex
- Tloušťka materiálu: 0,3 mm
- Cena 340,- Kč/m²
- $\zeta_M = 1200 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_F = 1800 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_C = 1530 \text{ kg/m}^3$



Technologie:

- Doba výroby vzorku včetně separace formy byla 4 hod. Separace formy byla cca 1 hod.
- Teplota T=20 °C (klimatizováno).
- Spotřebováno 440 g pryskyřice a 168 g tužidla, celkem 608 g ± 10%. Pro potřebu TL-Ultralight 2 standardní kelímky.
- Na výrobu 1 tyčky použito 17 x vrstev po 20 mm páscích materiálu v délce 500 mm.



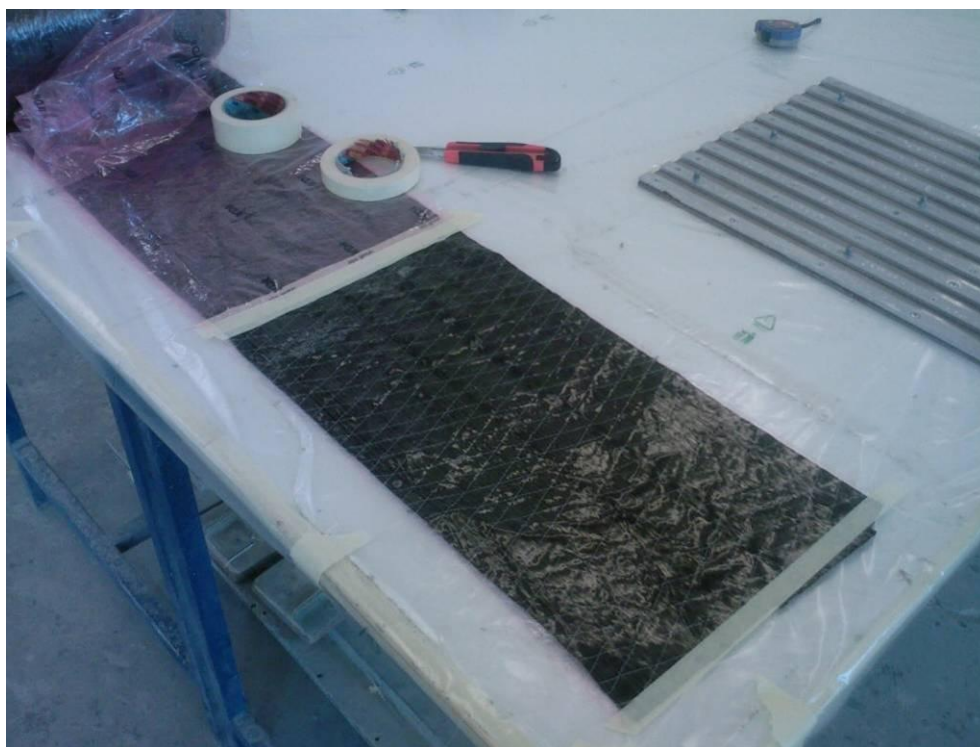
Obrázek 23 - Dodaný materiál (role)



Obrázek 24 - Detail struktury (Epo UDO UD CS 200/300)

Výroba

Z dodané role byl odvinut plát o délce 500 mm, z něhož byla odstraněna vrchní krycí fialová folie. Aby došlo k zamezení třepení materiálu, na obou koncích byl plát přelepen papírovou izolepou. Pomocí válečku šířky 100 mm a jeho následnou aplikací (válečkování) byl materiál prosycován namíchanou pryskyřicí a tužidlem. Pro kompletní prosycení materiálu bylo nutné cca 30x větší silou aplikovat pryskyřici a tužidlo válečkem. Poté byly nastříhány pásy v šířce 20 mm nastříhaly pásy. Stříhání je v této fázi obtížné a je nutné dát si pozor, aby se nedošlo k vzájemnému slepení pásků. Pásy byly následně v 17 vrstvách pro jeden zkušební vzorek pokládány do formy. Mezi každou vrstvou je potřeba se pokusit max. vytlačit přebytečnou pryskyřici dřevěnou špachtlí a do tloušťky 5mm nahustit daných pásku co nejvíce na sebe k zajištění potřebné pevnosti.



Obrázek 25 - Výroba vzorku

Po nanesení všech nastříhaných a prosycených pásků do formy bylo vyrobeno všech 10 ks potřebných vzorků. Následně jsme formu přiklopili vrchní deskou, dostatečně na střídačku dotáhli všech 9 matic. Po tomto dotažení vytekla ještě další

přebytečná pryskyřice. Vzorky byly ve formě ve vodorovné pozici pečeny při konstantní teplotě $T=60^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hod.



Obrázek 26 - Kompletace formy před pečením

2. Uhlíkový rovingy (TORAYCA SC 700)

Tento materiál je jedním ze dvou materiálů, které se ve firmě TL-Ultraligh v současné době používají. Dodavatelem byla česká firma Skolil (www.skolil.cz)



Materiál:

- Materiál je používán ve špulkách (viz obr. 27)
- Typový název: TORAYCA SC 700
- Rovings: Carbon
- Cena 1050,- Kč/kg
- $\zeta_M = 1200 \text{ kg/ m}^3$
- $\zeta_F = 1800 \text{ kg/ m}^3$
- $\zeta_C = 1490 \text{ kg/ m}^3$

Technologie:

- Doba výroby vzorku včetně separace 2 hod. Separace formy byla 1 hod. Tato doba je brána jako průměrný výkon zaměstnance firmy TL-Ultralight, mne tato výroba trvala o 0,5 hod. déle. Zde musím ještě zohlednit o 0,5 hod. delší dobu při přípravě materiálu do stroje včetně přípravy samotného stroje.
- Spotřebováno 550 g pryskyřice a 210 g tužidla, celkem $760 \text{ g} \pm 10\%$. Tato dávka je automatická.
- Na výrobu 1 tyčky použito 119 - 120 rovingových vláken.

Výroba:

Na tomto podnikové stroji zkonstruovaném ve firmě TL-Ultralight se z rovinových vláken malosériově vyrábí pásnice. Pro objektivnost postupu výroby byla z tohoto důvodu zachována stejná technologie pro výrobu vzorku i v případě tohoto experimentu. Při výrobě je za strojem umístěno 17 špulek s materiálem. Z každé špulky je vedeno po vlákně do daného stroje, kde se vlákna prosycují a spojují v jeden svazek, který je ručně tažen přes 2 horizontálně umístěné válce, kde se odděluje přebytečná pryskyřice. Pak se v požadované délce svazek odstříhne a položí se do formy. Pro prvních 5 vzorků bylo ze 17 špulek nataženo 7 svazků a pro dalších 5 vzorků bylo z 15 špulek nataženo 8 svazků (tento rozdíl byl způsoben faktem, že na 2 špulkách došel materiál).



Obrázek 27- Příprava sytícího stroje

Opět mezi každou vrstvou byla přebytečná pryskyřice maximálně vytlačena a daná páska nahustěna co nejvíce na sebe (z důvodů dosažení požadované pevnosti).

Dále byl aplikován stejný postup jako v předchozím případě. Po nanesení všech pásku do formy a zhotovení všech 10 ks pásků byla forma přiklopena vrchní deskou, střídavě bylo dotaženo všech 9 matic. Následně se dala forma se vzorky zapéci na 24 hod do pece při teplotě $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tomto případě byl zaznamenán větší výtlač pryskyřice díky bohatšímu prosycení výrobního stroje.



Obrázek 28 - Nanesený materiál



Obrázek 29 - Úprava před zaformováním



Obrázek 30 - Detaily zaformování



3. Prepreg

Prepreg je skleněná, uhlíková, případně kombinovaná výztuž prosycená polymerní matricí. Výztuž je obvykle ve formě rovingu nebo tkaniny. Polymerní matrice je směs reaktoplastické pryskyřice a vytvrzovacího systému, který je za běžných teplot latentní. Obsah výztuže je volitelný dle typu prepregu. Prepreg se vytvrzuje zvýšenou teplotou (příp. světlem) ve formě na finální kompozitový díl.

V rámci experimentu byl k dispozici prepreg jak rovinový, tak tkaninový, ale řádný zkušební vzorek byl nakonec vyroben jen z tkaninového prepregu, který byl k dispozici v dostatečném množství.

- a) Vzhledem k tomu, že rovinového prepregu nebylo k dispozici dostatečné množství, byla vyrobena pouze 1 necelá zkušební tyčka o délce cca 100 mm a materiál nebyl dále zkoumán. Tento materiál byl dodán německou firmou SGL Technik GmbH.

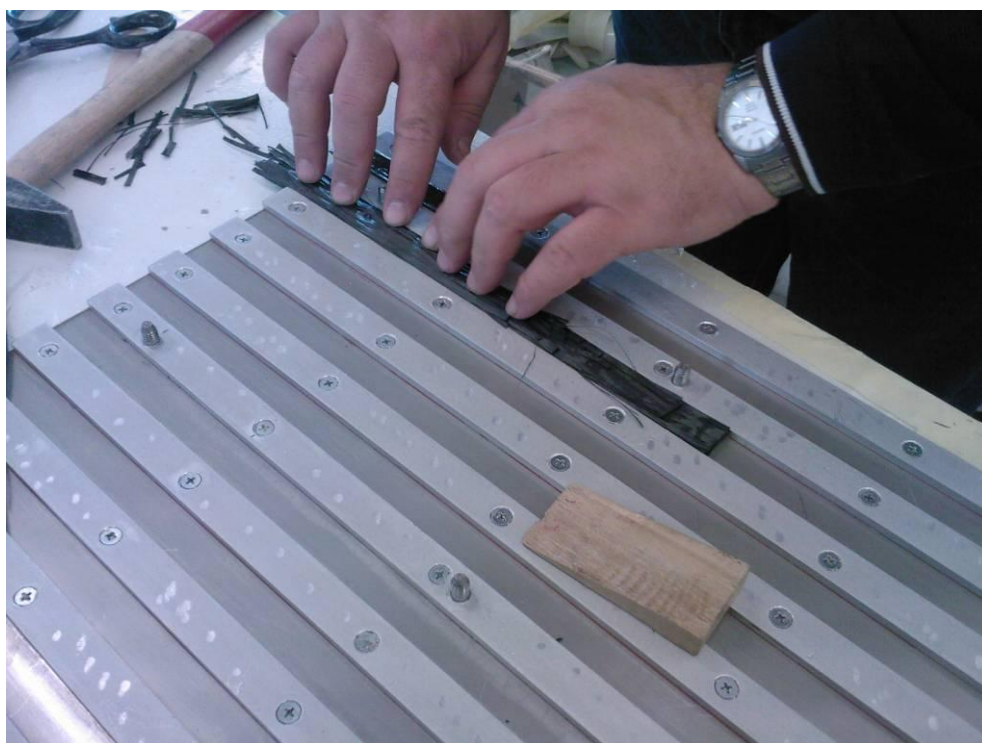
Materiál:

- Materiál je používán ve špulkách viz obr.
- Typový název: Sigrafil NF-24
- Rovings: Carbon
- Cena 990,- Kč/m²



Obrázek 31 - zkušební tkaninový prepreg

Výroba částečného kusu tyčky, který byl vyráběn alespoň pro účely porovnání obou prepregu.



Obrázek 32 - Výroba vzorku



b) Tkaninový

Tento materiál byl dodán českou firmou Skolil (www.skolil.cz).

Materiál:

Materiál je používán v rolích viz obr.

- Váha: 163 g/m^2
- $\zeta_M = 1200 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_F = 1800 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_C = 1560 \text{ kg/m}^3$
- Typový název: Prepreg M10

Pozn.: nutno skladovat kvůli prosycenému materiálu v chladu, nelépe v lednicích.

Technologie:

- Doba výroby vzorku včetně separace 2,5 hod. Separace formy cca 1 hod.
- Tento materiál už výztuž prosycená polymerní matricí obsahuje. Tento poměr by měl být nejobjektivnější. Ale nutno skladovat v mrazicích boxech.
- Na výrobu 1 tyčky použito 25 až 26 vrstev po 20 mm páscích materiálu.

Výroba:

Z dodané role byl odvinut plát materiál na délku 500 mm. Následně byly nařezány pásy o šířce 20 mm v délce 500 mm. Z plátu byla odstraněna spodní krycí bílá folie. Jednotlivé pásy byly poklady do formy, dostatečně upěchovány a sloupnuta další vrchní modrá folie. Z důvodů dosažení dostatečného upěchování jednotlivých vrstev byl použit dřevěný hranolek a gumová palice viz následné obr. V této fázi je nutné dbát na to, aby nevznikaly vzduchové bubliny. I v tomto případě je dobré aplikovat co nejvíce vrstev vzhledem k dosažení požadované pevnosti materiálu.



Obrázek 33 - Role prepregu

Dále byl aplikován stejný postup jako v předchozích případech, kdy po nanesení všech pásků do formy došlo k přiklopení formy vrchní deskou, dotažení všech 9 matic a zapečení v troubě při teplotě $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 34 - Výroba vzorku – nanášení materiálu



Obrázek 35 - Výroba vzorku – přechování materiálu



Obrázek 36 - Výroba vzorku – strhávání vrchní fólie



Obrázek 37 - Připravené vzorky



Obrázek 38 - Zaformování před pečením

4. Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)

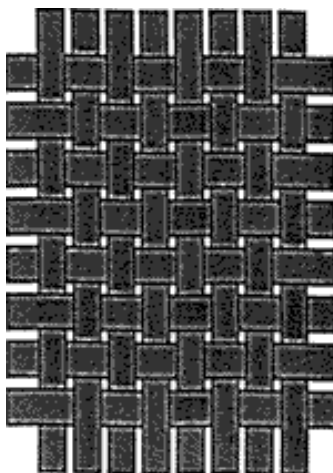
Tento materiál je druhým z dvojice materiálů, které se ve firmě TL-Ultraligh v současné době standardně používají. Materiál byl dodán od české firmy Skolil (www.skolil.cz)

Materiál:

- Materiál je používán v rolích viz obr. 40
- Typový název: HexForce 42165900
- Tloušťky: 0,17 mm
- Váhy 168 g/m^2
- Standardní šíře: 900 mm
- Cena 300,- Kč/m²
- $\zeta_M = 1200 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_F = 1750 \text{ kg/m}^3$
- $\zeta_C = 1450 \text{ kg/m}^3$

Technologie:

- Doba výroby vzorku včetně separace 2,5 h (separace cca 1 hod.)
- Spotřebováno 250 g pryskyřice a 95 g tužidla, celkem $345 \text{ g} \pm 10\%$. Toto množství použito jen na rozměr tyčky do délky 300 mm.
- Na výrobu 1 tyčky použito 30 vrstev materiálu.



Obrázek 39 - Standardní uspořádání karbonových tkanin Hexcel®

Materiálové vlastnosti

Unidirectional fabrics											
Weight g/m ²	Style	Weave	Weight rate Warp/Weft	Fiber Count		Reinforcement yarn		Std width cm	Thickness mm	Powdering	Tracers
				Ch-Wp	Tr-wt	Warp	Weft				
170	42165	UD Plain	98/2	8,1	4	3K HR	EC5 5,5x2	90	0,17		



Obrázek 40 - Dodaný materiál (role)

Výroba:

Pro zachování objektivnosti postupu výroby byla u vzorku použita stejná technologie výroby jako ve firmě TL-Ultralight. U tohoto materiálu je použito vakuování. Z dodané role byl odvinut materiál na délku 350 mm, následně byl odstříhnut pruh tkaniny, která byla rozstříhána na čtverce (celkem 30 ks pro zajištění výšky vzorku 5 mm). Z výroby bylo odzkoušeno na 6 vrstev o výšce cca 1mm.

Následně bylo potřeba připravit dřevotřískovou desku, která se oseparovala. Poté se na desku umístila strhávací folie a postupně se vše vrstvilo a prosycovalo až do 30-ti vrstev tkaniny. Prosycení pryskyřicí bylo opět prováděno válečkem.



Obrázek 41 - prosycení

Následovala opět vrstva strhávací folie, na ní byl položen vatelín a přes celou desku byl pokladen igelit, který se po stranách přilepil oboustrannou izolepou, vše se poté dolepilo papírovou páskou. Mimo tento vzorek se pro potřeby odsávání vytvořil odsávací otvor, do kterého byl umístěn náhubek, který se utěsnil modelínou. Připojilo se odsávání a následovalo 24 hodinové vakuování. Vše viz obr. Obecně by vakuování mělo probíhat minimálně 12 hod. a více, tvrdnutí poté minimálně 24 hod. při 18 °C, poté je možné vložit i do pece. Vakuováním je odstraněno zhruba 10-15% přebytečné pryskyřice.



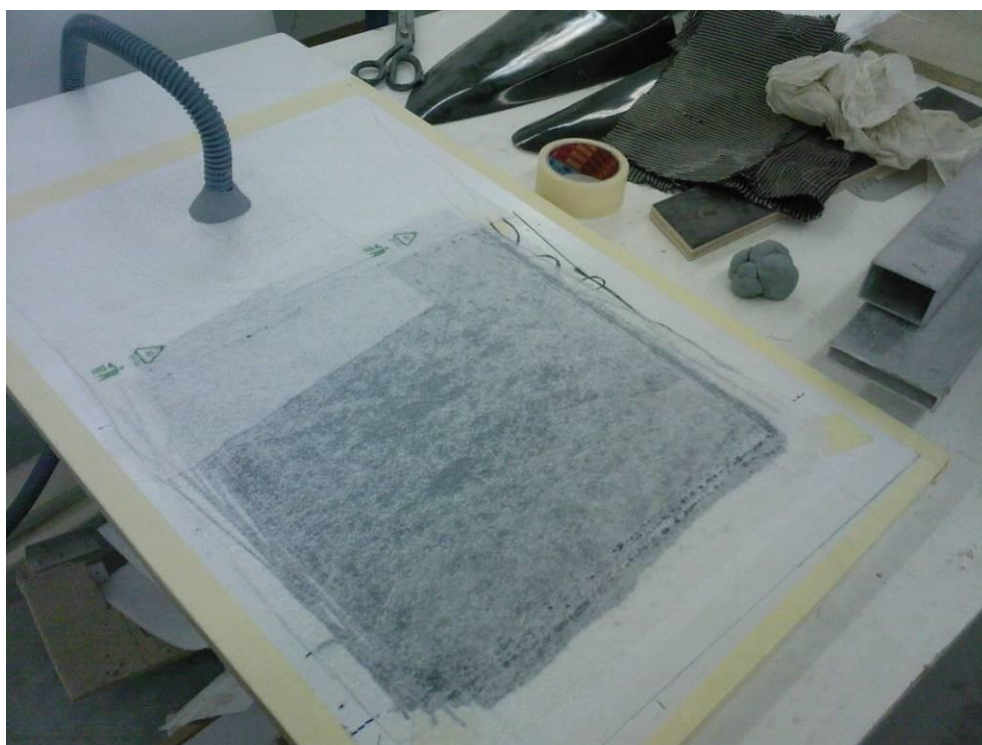
Obrázek 42 - Nanesení strhávací fólie



Obrázek 43 - Rozložení vatelínu



Obrázek 44 - Příprava pro vakuování



Obrázek 45 - Vakuování



5. Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)

Tento materiál byl dodán od americké firmy MARSKE AIRCRAFT CORP. (www.marskeaircraft.com.) Výrobu těchto vzorků zprostředkovala externí firma.

Materiál

Materiál byl dodán jako pultruzní drátky čtvercového průřezu o velikosti 4x4 mm.

- Typový název: GRAPHLITE carbon rod (obchodní název)
- Tloušťka materiálu: 4 mm
- Cena 32,- za metr drátku
- Pevnost v tahu: 2414 MPa
- Tažné moduly: 141 gpa
- Pevnost v tlaku: 1931 MPa
- Tlakové moduly: 138 gpa
- Tolerance průměru: +/- 5%

Technologie:

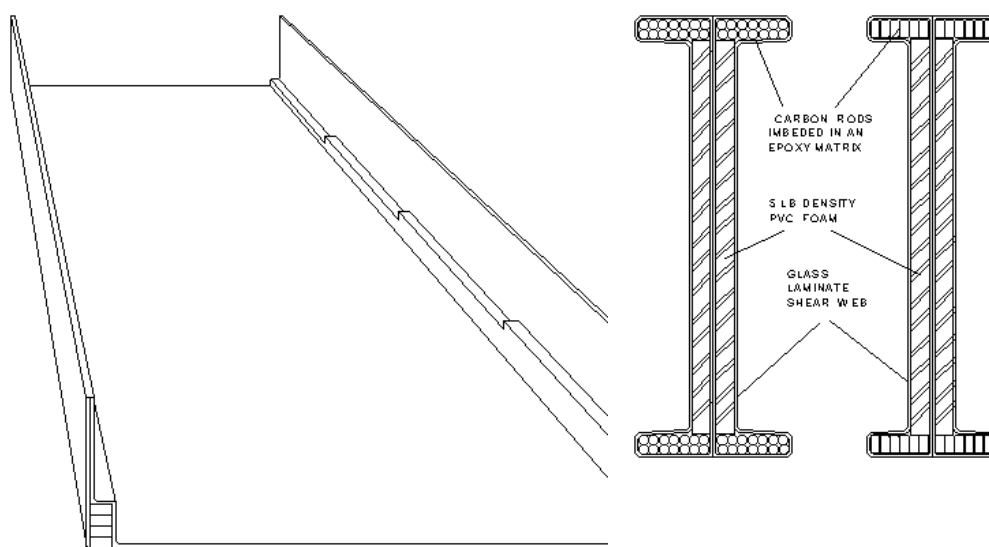
- Doba výroby vzorku včetně separace 4 hod. (jen 4 ks – nedostatek materiálu)
- Spotřebováno 380 g pryskyřice a 150 g tužidla, celkem 530 g \pm 10%.
- Na výrobu 1 tyčky použito 10 čtvercových pultruzních drátků.

Tento nový materiální slouží speciálně k výrobě křídla a je při téměř poloviční váze více jak šest krát pevnější než hliník. Při srovnání s uhlíkem je téměř 3,5 krát pevnější v napětí a 5,5 krát pevnější v tlaku. Tento materiál se dodává ve formě pultruzních drátku kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu v různých velikostech.

Publikované hodnoty ve firmě MARSKE AIRCRAFT CORP.

TYPICAL MATERIALS USED IN AIRCRAFT CONSTRUCTION
PROPERTIES ON A STRENGTH TO WEIGHT RELATIONSHIP

Item	Material	Tensile Strength per pound (T / lb)	Compressive Strength per pound (C / lb)	Stiffness per pound (E / lb)	Material Density (pcf)
1.	Graphlite Carbon Rod / Epoxy	3,368	2,895	224,211	95
2.	Carbon Roving / Epoxy	1,277	532	196,809	94
3.	Fiberglass Roving / Epoxy	833	416	45,833	120
4.	6061-T6 Aluminum	235	206	61,176	170
5.	2024-T3 Aluminum	353	235	61,176	170
6.	Sitka Spruce	370	185	48,148	27



Obrázek 46-Výroba pásnic ve firmě MARSKE AIRCRAFT CORP.

Výroba:

Nejprve byly nařezány pultřuzní drátky do délky 360 mm. Dále bylo potřeba přichystat látku typ 92110, do které se pultřuzní drátky zabalily jako do košilky. Drátky byly jednotlivě prosycovány pryskyřicí a následně kladeny do plastové formy, vždy 5 drátů na spodní vrstvu a 5 drátů na horní vrstvu. Následovalo zabalení, zatížení, stáhnutí svorkami a vytvrzení (viz obr.51).



Obrázek 47 - Sycení materiálu



Obrázek 48 - Kladení materiálu



Obrázek 49 - Zabalení materiálu



Obrázek 50 - Zatížení zabaleného materiálu



Obrázek 51 - Zafixování materiálu

Zkouška ohybem

Zkouška ohybem poskytuje důležité konstrukční podklady pro polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, k čemuž dochází u většiny případů. Jedná se nejen o nosníky, ale např. o samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny, apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

Zkouška v ohybu charakterizuje polymery z hlediska použitelnosti. Polymery dělíme na křehké (lámavé) a na houževnaté. Při této zkoušce na materiál působíme tlakem. Vlastní zkouška vyžaduje přesné zachování předepsaných podmínek. Je třeba znát šířku, výšku vzorku, vzdálenost mezi podpěrami a rychlost provedení zkoušky.

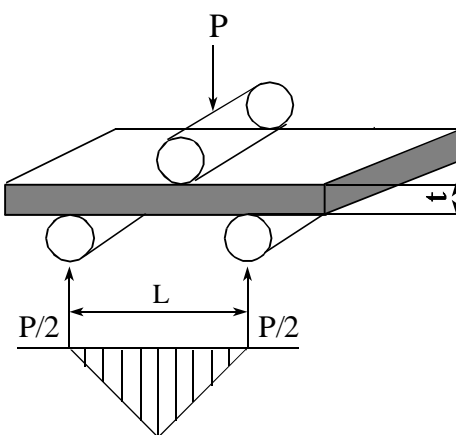
Hodnotu modulu pružnosti E získáme z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii zkoušeného vzorku.

Typy ohybových zkoušek

- tříbodová - zkouška na dvou podpěrách; využívá se pro krátké a tenké vzorky
- čtyřbodová - výhodná pro velké a tlusté vzorky

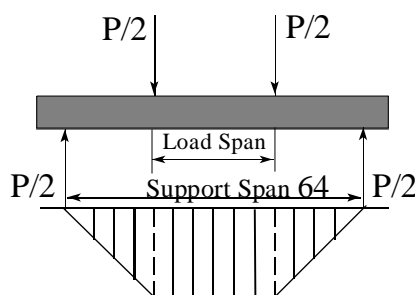
Při tříbodové zkoušce je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty (ČSN EN ISO178).

Schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.



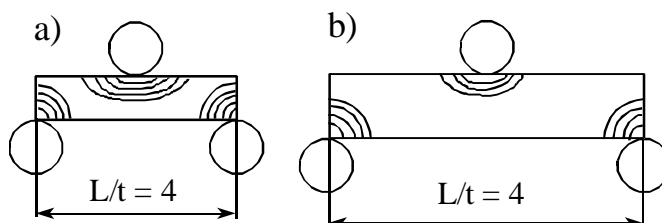
Při čtyřbodové zkoušce je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné třetině nebo jedné polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u tříbodového systému a jak ukazuje obr. 2, je i jiné rozložení ohybového momentu. Jeho rovnoměrnější působení v celé délce zkušebního tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje hlavně tímto způsobem.

Schéma čtyřbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.



Přechod ke čtyřbodovému systému je dán především snížením celkové koncentrace napětí v místech styku vzorku s trny jak podpěrnými tak zatěžovacími, což umožňuje testování tenčích vzorků ve srovnání s třibodovým ohybem.

Efekt koncentrace napětí u vzorků rozlišené tloušťky (a: tenký vzorek, b: tlustý vzorek)



Způsob přípravy zkušebních těles, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou zakotveny pro daný typ materiálů v příslušných normách. Normy pro stanovení ohybových vlastností plastů jsou tyto: třibodový systém pro plasty ČSN EN ISO178, třibodový systém pro nevyztužené i vyztužené plasty a elektrické izolátory ASTM D 790 (American Society for Testing and Materials), čtyřbodový systém pro nevyztužené i vyztužené plasty a elektrické izolátory ASTM D 6272.

ČSN EN ISO 178

Tato norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností plastů za definovaných podmínek. Je definováno standardní zkušební těleso, ale tam kde je to vhodné, lze volit alternativní rozměry těles. Je udána řada hodnot rychlostí zkoušky.

Metoda se používá ke zjištění chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (třibodový ohyb).



Metoda je vhodná pro následující materiály:

- vstřikované a vytlačované termoplasty
- lisovací reaktoplasty
- vlákny vyztužené reaktoplastové a termoplastové kompozity

Podpěry a zatěžovací trn

Poloměr trnu (R_1) a poloměr podpěr (R_2) musí být následující:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm pro tloušťky tělesa} \leq 3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm pro tloušťky tělesa} > 3 \text{ mm}$$

Typ tělesa

$$\text{délka } l = 280 \text{ mm}$$

$$\text{šířka } b = 20 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{tloušťka } h = 5 \pm 0,2 \text{ mm}$$

Rozpětí podpěr L se nastaví tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %): $L = (16 \pm 1) \text{ hod.}$

V tomto případě jsem délku volil pro potřeby firmy TL-Ultraligh.

Rychlost zkoušky se nastaví dle požadavků v předmětové normě zkoušeného materiálu. Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 2 mm/min. pro přednostní těleso).



Průběh zkoušky

- stanovení ohybových vlastností (tříbodové uspořádání dle normy ČSN EN ISO178)
- stanovení tvaru a rozměru testovaných tělísek dle normy (v tomto případě tramečky obdélníkového průřezu o rozměrech (20 x 5 x 280 mm))
- příprava vzorků pro testování
- zajištění podmínek testování ($v = 1 \text{ mm/min.}$)
- zajištění zkušebního zařízení WPM Leipzig
 - měřící hlava: 10 kN
 - konektor: 10 kN (nutná kontrola připojení správného konektoru, musí souhlasit s testovací hlavou)
 - čelisti: pro tříbodový ohyb
- vyhodnocení (výpočet pevnosti a modulu pružnosti v ohybu testovaných vzorků, odůvodnit případné nesrovnalosti)

Zkoušky materiálových charakteristik u kompozitních materiálů lze provést různými metodami materiálových zkoušek. Pro tento experiment byla vybrána výše zmíněná zkouška ohybem, která se pro tyto účely v praxi uznává jako jediná referenční. Zároveň byla tato zkouška doporučena i na základě podnikové praxe firmy TL-Ultralight a doporučení firmy Schempp Hirth s.r.o.

Zkouška byla provedena u certifikované firmy Schempp Hirth s.r.o. dle německé normy ASTM. Slouží pro návrh rychlých přejímacích zkoušek. Výsledky této zkoušky byly důležité při rozhodnutí, zda je možné spustit výrobu daného materiálu pro použití při výrobě ultralehkých letadel.

Pevnostní přejímka zkouškou se provádí u jediné součásti letounu a to u uhlíkových pásnic.

Jak už bylo dříve zmíněno, zkouška ohybem byla provedena na vzorku pásnice o rozměrech 20 x 5 x 280 mm. Tyto rozměry byly zkontrolovány a převzaty

od certifikované firmy Schempp Hirth s.r.o. Přejímací zkouška je zkouška trojbodým ohybem do zlomu na základě následujícího schématu $L=280$ mm. Při zlomu musí být dosaženo minimální síly určené pro daný typ použitého rovingu.

Připravené vzorky

Pro potřeby experimentu byly připraveny vzorky v počtu 10 ks od každého materiálu, pouze v případě Marského carbonu pouze v počtu 4 ks (nedostatek materiálu). Před zkouškou byly všechny vzorky zkráceny na délku 280 mm kvůli možnostem trhacího stroje. U každého vzorku byla důkladně změřena šířka, výška, délka a váha.



Obrázek 52 - připravené vzorky v jednotlivých sadách

Trhací stroj

(kalibrace stroje proběhla 3. 4. 2008)

Zkouška trojbodým ohybem do zlomu na základě následujícího schématu byla provedena na trhacím stroji WPM Leipzig. U stroje byla volena rychlost



zatěžování dle interních předpisů firmy Schempp-Hirth s.r.o. a normou pro německé úřady LBA.

Při porušení zkušebních vzorku docházelo jak ke kolmému lomu, tak i k delaminaci mezi vrstvami (viz obrázky v příloze).

- U materiálu jednosměrné uhlíkové tkaniny (Epo UDO UD CS 200/300) nám došlo v devíti případech k úplnému prasknutí, jen u vzorku I3 došlo k delaminaci.
- U materiálu TORAYCA SC 700 nám došlo u dvou vzorku II5 a II9 k úplnému prasknutí u zbylých došlo k delaminaci.
- U prepregu M10 nám u vzorku III3 a III6 došlo k delaminaci, u zbylých došlo k úplnému prasknutí.
- U jednosměrné tkaniny HexForce došlo u vzorku IV 1 k úplnému porušení, u zbylých k delaminaci.
- A u Marskeho carbonu mimo vzorek V1 došlo k úplnému prasknutí.

U každého vzorku se sledovalo zatížení při zlomu F (N) (tato hodnota nám jen určí kvalitu průřezu – pro spuštění výroby) a velikost průhybu y (mm). Z těchto hodnot bylo dle následujících vztahů dopočítáno ohybové napětí a modul pružnosti E .

Změřené a vypočtené hodnoty zkušebních vzorků jsou uvedeny v kapitole Naměřené a vypočtené hodnoty.

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot F \cdot 280}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$$E = \frac{F \cdot 280^3}{4 \cdot y \cdot b \cdot h^3}$$

Na následujícím obrázku je vidět praktický příklad ohybové zkoušky u náhodně vybraného materiálu marský carbon (viz obr.53).



Obrázek 53 - Trhací stroj



Obrázek 54 - Detail průhybu



Obrázek 55 - Detail zatížení



Obrázek 56 - Stupnice z které se hodnoty odečítaly



Obrázek 57 - Praktický příklad přelomeného vzorku.

Naměřené a vypočtené hodnoty

Pro usnadnění byly výpočty provedeny pomocí tabulkového editoru (MS Excel) s použitím níže uvedených vzorců.

Máme-li jednoduchý nosník umístěný na dvou podpěrách a působí-li síla F v jeho středu, vycházíme při výpočtu maximálního napětí v povrchových vrstvách z Navierova vzorce.

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot F \cdot 280}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

V ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna a zkouší se prakticky jen v tangenciálním směru. Odvození modulu pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Deformace při ohybu je definována jako poměr vzniklého průhybu nosníku a poloměru ohybu.



Modul pružnosti v ohybu vychází z ohybového momentu, který lze odvodit ve tvaru:

$$M_T = \frac{E_L \cdot I_T}{r}$$

M_T - ohybový moment

E_L - modul pružnosti

I_T - modul průřezu

r - poloměr ohybu

Platí-li pro elementární deformaci rovnost lze poloměr ohybu vyjádřit na základě podobnosti pravoúhlých trojúhelníků jako:

$$r = \frac{\partial^2 x_1^2}{\partial^2 x_2}$$

Dosazením do předešlého vztahu dostáváme:

$$\frac{\partial^2 x_2}{\partial x_1^2} = \frac{M_T}{E_L \cdot I_T}$$

Řešením této parciální diferenciální rovnice dostaneme maximální průhyb nosníku:

$$x_{2_{max}} = \frac{F l^3}{48 E_L I_T}$$

Uvažujeme-li s pravoúhlým průřezem nosníku, tedy $I_T = \frac{bh^3}{12}$ a $x_2 = \frac{h}{12}$, získáváme rovnici pro výpočet modulu pružnosti v ohybu se zatížením ve středu tělesa:

$$E = \frac{F \cdot 280^3}{4 \cdot y \cdot b \cdot h^3}$$

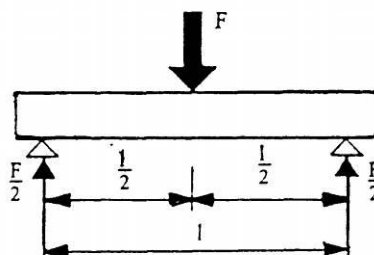
F - působící síla (N)

l_0 - vzdálenost podpěr (mm) = 280 mm

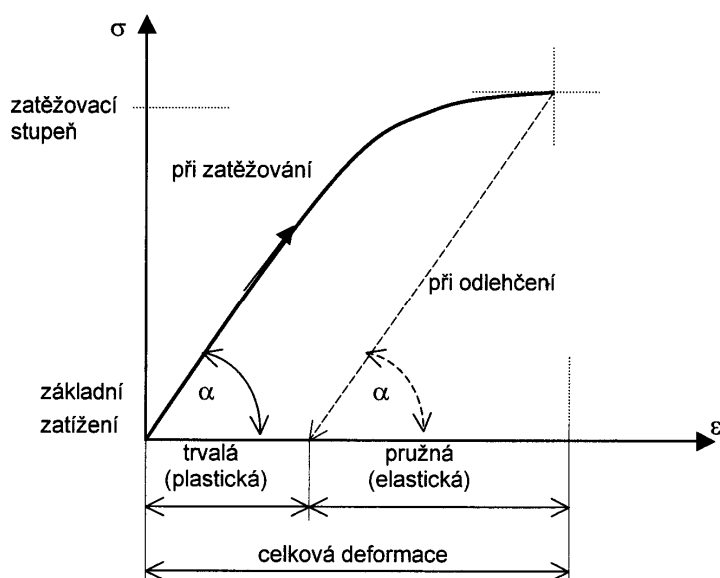
b - šířka zkušebního tělesa (mm)

h - výška zkušebního tělesa (mm)

y - průhyb tělesa (mm)



Znázorníme-li závislost zatížení a deformace, je zřejmé, že při nárůstu zatížení - napětí dochází k přetvoření. Odlehčíme-li prvek, pak nezanikne celá deformace ale pouze její pružná, neboli elastická část. Setrvávající deformace je trvalá, neboli plastická. Součet obou deformací označujeme jako deformaci celkovou. U různých materiálů je vzájemný poměr pružné a trvalé části deformace různý. Obecně platí, že při nízkých napětích se většina materiálů chová pružně.



Obrázek 58 - Průběh deformace vzorku při zatěžování a odlehčování

Vzorky byly postupně označeny skupinou materiálu a následně očíslovány dle výroby jednotlivých zkušebních tyčinek:

I - Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300)

II - Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700)

III – HexPly Prepreg M10

IV - Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)

V – Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)

Vzorek	šířka vzorku	výška vzorku	Síla	ohybové napětí	materiál vzorku	Hmotnost	Průhyb	E
	b (mm)	h (mm)	(N)	σ_o (MPa)		[g]	[mm]	[MPa]
I 1	19,2	5,1	760	639	Sigrafil	40,5	24	68234,6
I 2	19,1	5,2	920	748	Sigrafil	42,6	24	78333,5
I 3	19,9	5,3	1020	766	Sigrafil	46,6	24	78726,8
I 4	21,2	5,2	1090	799	Sigrafil	43,6	39	51455,3
I 5	19,7	5,3	1120	850	Sigrafil	45,8	28	74848,0
I 6	20,0	5,2	1020	792	Sigrafil	43,1	29	68639,8
I 7	20,3	5,2	940	719	Sigrafil	43,4	26	69512,4
I 8	20,4	5,2	1020	777	Sigrafil	45,3	31	62952,4
I 9	18,5	5,5	840	630	Sigrafil	41,5	25	59909,2
I 10	19,3	5,2	760	612	Sigrafil	39,5	28	54891,1
II 1	19,8	5,7	1260	823	Roving	49,7	26	72530,6
II 2	20,5	5,9	1300	765	Roving	53,2	24	70605,1
II 3	18,9	5,9	1220	779	Roving	48,6	23	74994,3
II 4	18,2	5,9	1280	849	Roving	46,6	25	75172,1
II 5	19,7	5,5	1530	1078	Roving	51,4	28	91494,1
II 6	20,4	5,8	1440	881	Roving	51,7	28	70909,5
II 7	19,7	6,1	1360	779	Roving	51,3	23	72572,1
II 8	20,4	5,8	1240	759	Roving	51,6	23	74335,1
II 9	19,3	5,8	1400	906	Roving	49,4	28	72869,0
II 10	20,9	5,7	1450	897	Roving	53,3	24	85664,3
III 1	19,8	5,1	1230	1003	Prepreg	42,8	28	91787,9
III 2	19,6	5,1	1230	1013	Prepreg	43	27	96158,8
III 3	20,8	5,1	1380	1071	Prepreg	45,8	28	98030,5
III 4	20,3	5,1	980	780	Prepreg	44,5	29	68870,9
III 5	18,0	5,1	1130	1014	Prepreg	40	26	99893,3
III 6	20,2	5,1	1030	823	Prepreg	45,3	23	91719,5
III 7	19,8	5,1	1300	1060	Prepreg	44,3	26	104474,0
III 8	18,0	5,1	1180	1059	Prepreg	39,3	27	100449,9
III 9	19,0	5,1	1160	986	Prepreg	42,4	23	109819,7
III 10	19,2	5,1	1350	1135	Prepreg	42,7	28	103891,0

Vzorek	šířka vzorku	výška vzorku	Síla	ohybové napětí	materiál vzorku	Hmotnost	Průhyb	E
IV 1	21,3	4,5	1120	1091	Uhlík	43,9	29	109198,6
IV 2	20,5	4,5	860	870	Uhlík	42,5	22	114841,4
IV 3	20,6	4,5	960	967	Uhlík	42,5	25	112264,0
IV 4	20,4	4,5	1000	1017	Uhlík	41,8	25	118088,2
IV 5	20,4	4,4	930	989	Uhlík	41,4	25	117481,3
IV 6	21,5	4,5	980	945	Uhlík	43,4	25	109805,5
IV 7	20,4	4,5	890	905	Uhlík	40,9	24	109477,6
IV 8	21,3	4,5	940	915	Uhlík	43,6	23	115557,2
IV 9	21,2	4,6	1000	936	Uhlík	43,6	24	110813,7
IV 10	20,5	4,5	920	931	Uhlík	42,2	24	112615,8
V 1	20	7	2840	1217	Marské	68,1	24	94666,7
V 2	20,0	6,8	2840	1290	Marské	67,3	25	99137,0
V 3	20,0	6,7	3100	1450	Marské	67,2	24	117844,7
V 4	20,4	6,8	3140	1398	Marské	69,2	27	99500,0

Objemové a hmotnostní podíly složek kompozitu

Objemové a hmotnostní podíly jednotlivých složek v kompozitové struktuře jsou důležitou charakteristikou pro odvození výsledných materiálových vlastností. Zatímco vyjádření obsahu výztuže formou objemového podílu je výhodné z hlediska pevnostních výpočtů a konstrukce, vyjádření téhož pomocí hmotnostního podílu je výhodnější pro potřeby technologie a výstupní kontroly z výroby. Objem kompozitního materiálu c_v je tvořen objemem výztuže f_v a matrice m_v . Podobně hmotnost kompozitu c_m je dána hmotnostmi výztuže f_m a matrice m_m . Poměrné zastoupení v objemových podílech budeme označovat V a v hmotnostních podílech M . Potom platí:

$$v_c = v_f + v_m, \quad V_f = \frac{v_f}{v_c}, \quad V_m = \frac{v_m}{v_c}, \quad V_f + V_m = 1$$

$$m_c = m_f + m_m, \quad M_f = \frac{m_f}{m_c}, \quad M_m = \frac{m_m}{m_c}, \quad M_f + M_m = 1.$$

Hustotu kompozitu vyjádříme buď z hmotnosti pomocí objemových podílů

$$m_c = m_f + m_m, \text{ dosazením za hmotnosti}$$

$$\rho_c \cdot v_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m, \text{ takže}$$

$$\rho_c = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m, \text{ resp. } \rho_c = \sum V_i \cdot \rho_i,$$

nebo z objemu pomocí hmotnostních podílů

$$v_c = v_f + v_m, \text{ dosazením za objemy } \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m},$$

V praxi je často důležité převádět objemové a hmotnostní podíly podle potřeby navzájem.

Výše uvedené vztahy jsou všeobecně známy a v praxi hojně používané. Je nutné ale upozornit, že reálná struktura kompozitu se neskládá z poměrného podílu výztuže a matrice, ale z absolutního množství výztuže prosyceného pojivovým systémem – matricí v potřebném objemu s určitou tolerancí danou konkrétní technologií výroby kompozitu.

To tedy znamená, že výsledná tuhost a pevnost kompozitové stěny je charakterizována zejména skutečností, že se v ní nachází například čtyři vrstvy tkaniny daného typu, které určují skutečnou tuhost a maximální přenesenou reakci. Matrice způsobí, že tyto charakteristiky rozpočítáme do menší či větší tloušťky stěny, která je skutečným konečným průmětem objemového či hmotnostního podílu matrice, spolu s výslednou hmotností stěny.

Vzorek	Hmotnostní podíl výztuže M _f	Hmotnostní podíl matrice M _m	Objemový podíl výztuže V _f	Objemový podíl matrice V _m
	(%)	(%)	(%)	(%)
I 1	62	38	53	47
I 2	59	41	50	50
I 3	54	46	46	54

Vzorek	Hmotnostní podíl výztuže M _f	Hmotnostní podíl matrice M _m	Objemový podíl výztuže V _f	Objemový podíl matrice V _m
I 4	57	43	48	52
I 5	55	45	47	53
I 6	58	42	49	51
I 7	58	42	49	51
I 8	55	45	47	53
I 9	60	40	51	49
II 0	63	37	54	46
II 1	56	44	46	54
II 2	56	44	45	54
II 3	61	39	50	50
II 4	64	36	53	47
II 5	58	42	48	52
II 6	58	42	48	52
II 7	58	42	48	52
II 8	58	42	48	52
II 9	60	40	49	51
II 10	56	44	46	54
III 1	67	33	58	42
III 2	68	32	59	41
III 3	70	30	60	40
III 4	69	31	59	41
III 5	65	35	56	44
III 6	69	31	59	41
III 7	69	31	59	41
III 8	65	35	56	44



Vzorek	Hmotnostní podíl výztuže M_f	Hmotnostní podíl matrice M_m	Objemový podíl výztuže V_f	Objemový podíl matrice V_m
III 9	67	33	58	42
III 10	67	33	58	42
IV 1	57	43	47	53
IV 2	55	45	45	55
IV 3	55	45	45	55
IV 4	55	45	45	55
IV 5	55	45	45	55
IV 6	57	43	47	53
IV 7	54	46	44	56
IV 8	57	43	47	53
IV 9	57	43	47	53
IV 10	55	45	45	55

U vzorku marského carbonu nebyly tyto hodnoty z důvodů výroby externí firmou měřeny a zaznamenány. Pórovitost není možné vzhledem k dostupným prostředkům přesně stanovit. Při experimentu bylo ale zachováno působení lidského faktoru při výrobě v souladu s požadavky firmy TL - Ultralight s.r.o. V případě laboratorní výroby vzorků by bylo dosaženo zcela odlišných hodnot pórovitosti, což by nekorespondovalo s podmínkami v praxi, kdy probíhá výroba převážně ručně.



Statistické zpracování dat

Výsledky zkoušek jednotlivých sad zkušebních vzorků kompozitních materiálů byly statisticky vyhodnoceny. U každé sady vzorku je určena:

1. Průměrná hodnota sady

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

kde

x_i hodnota zpracovávané veličiny
 n počet zpracovávaných vzorků

2. Minimální hodnota sady

Minimální hodnota ze sady zpracovávaných vzorků

3. Maximální hodnota sady

Maximální hodnota ze sady zpracovávaných vzorků

4. Směrodatná odchylka

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot (\bar{x})^2}{n-1}}$$

kde

x_i hodnota zpracovávané veličiny
 n počet zpracovávaných vzorků
 \bar{x} průměrná hodnota zpracovávaných vzorků

5. Variační koeficient

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad [\%]$$

kde

s_{n-1} směrodatná odchylka zpracovávané sady vzorků
 \bar{x} průměrná hodnota zpracovávaných vzorků

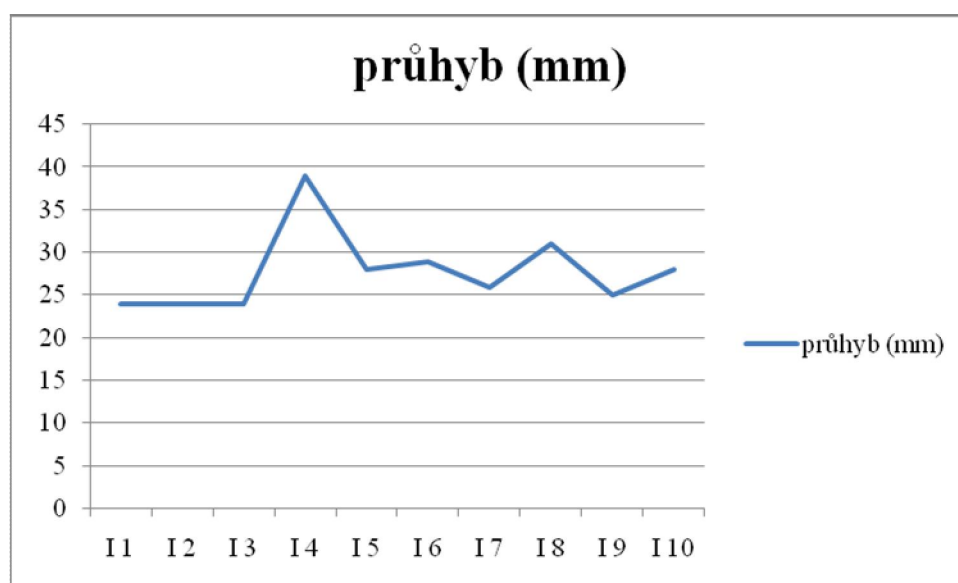
Variační koeficient je podobný ukazatel jako relativní průměrná odchylka, protože udává variabilitu v procentech. Používáme ho při srovnávání variability téhož znaku ve dvou statistických souborech nebo při srovnávání variability dvou či více znaků. Čím nižší je variační koeficient, tím větší je homogenita souboru.

Grafické znázornění výsledných hodnot:

- průhybu
- ohybovém napětí

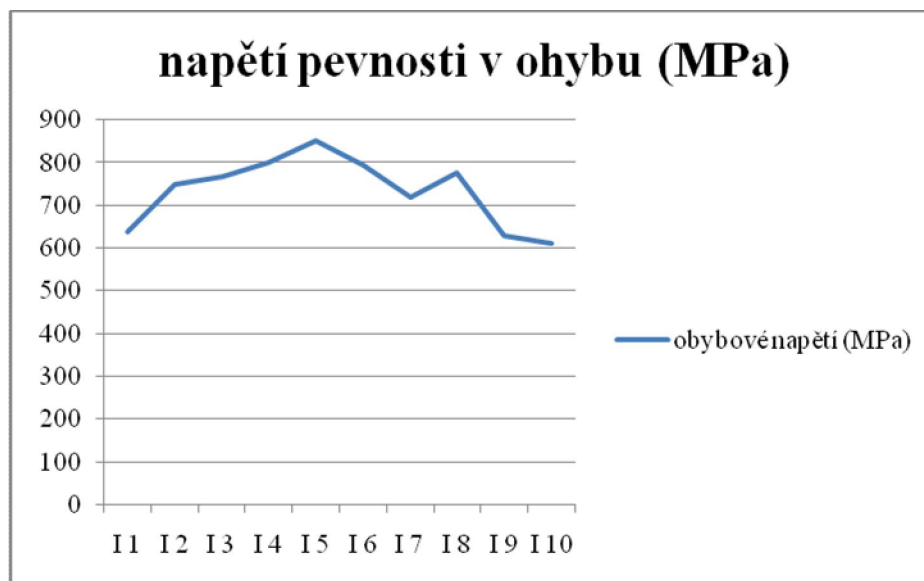
modulu pružnosti E - tuhé těleso účinkem vnějších sil mění svůj tvar - deformuje se. Většina tuhých látek se po deformaci vrací do původního tvaru, přestanou-li působit deformující síly. Hranice, do které mohou na těleso působit síly bez toho, aby se trvale deformovalo, se nazývá mez pružnosti. K posouzení pružnosti dané látky zavádíme materiálovou konstantu - Youngův modul pružnosti E . Modul pružnosti E zkoumáme ve směru vláken, to nás pro tento případ zajímá nejvíce.

I - Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo)



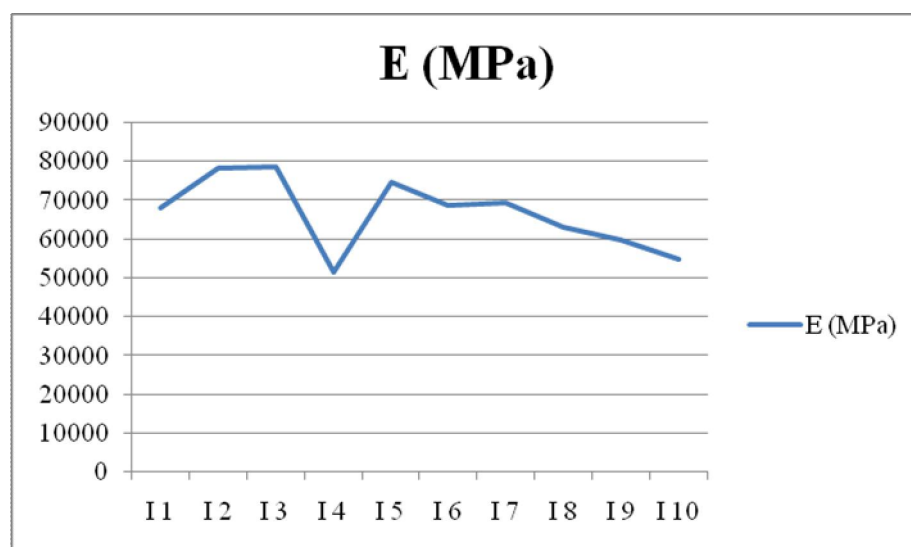
Osa x – použité vzorky

Osa y – průhyb (mm)



Osa x – použité vzorky

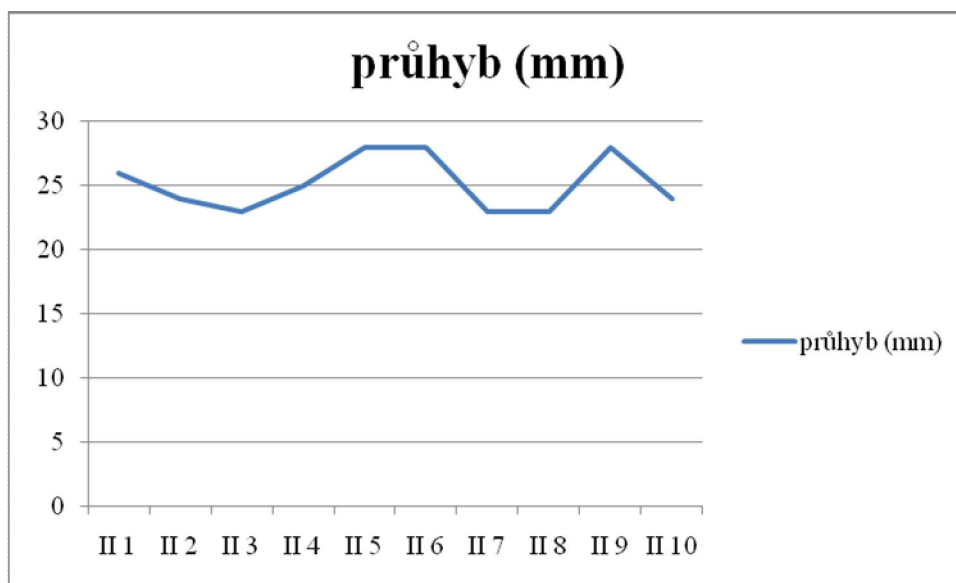
Osa y – napětí pevnosti v ohybu (MPa)



Osa x – použité vzorky

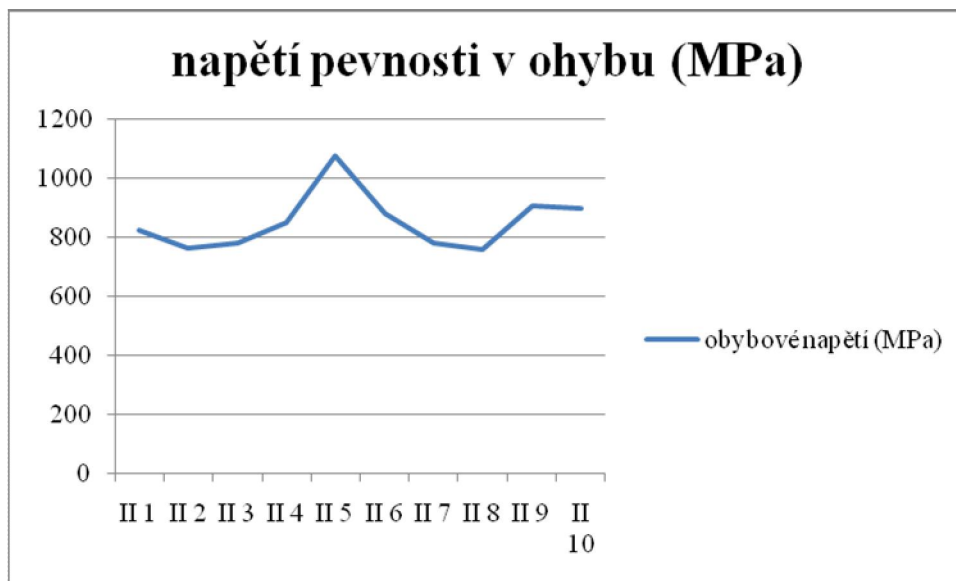
Osa y – modul (MPa)

II - Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700)



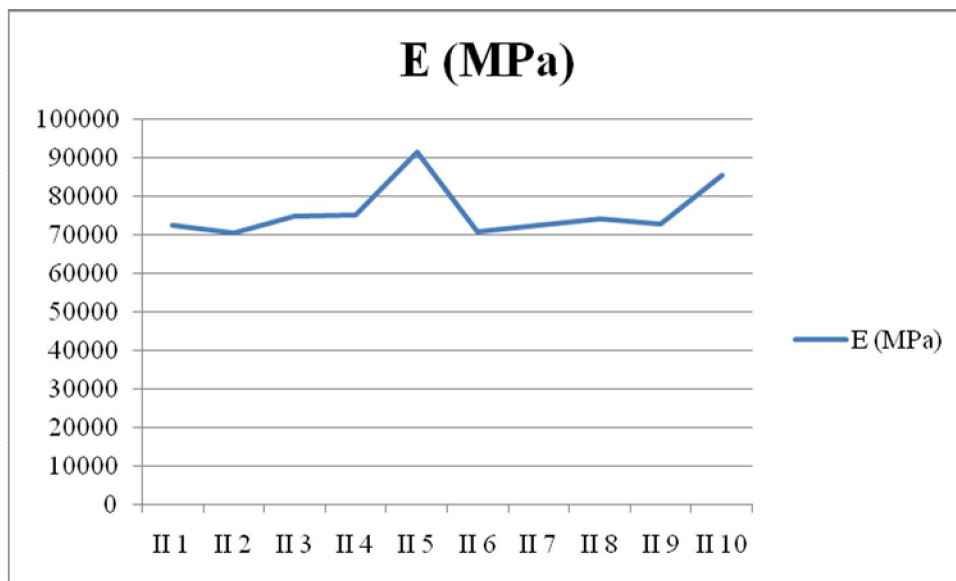
Osa x – použité vzorky

Osa y – průhyb (mm)



Osa x – použité vzorky

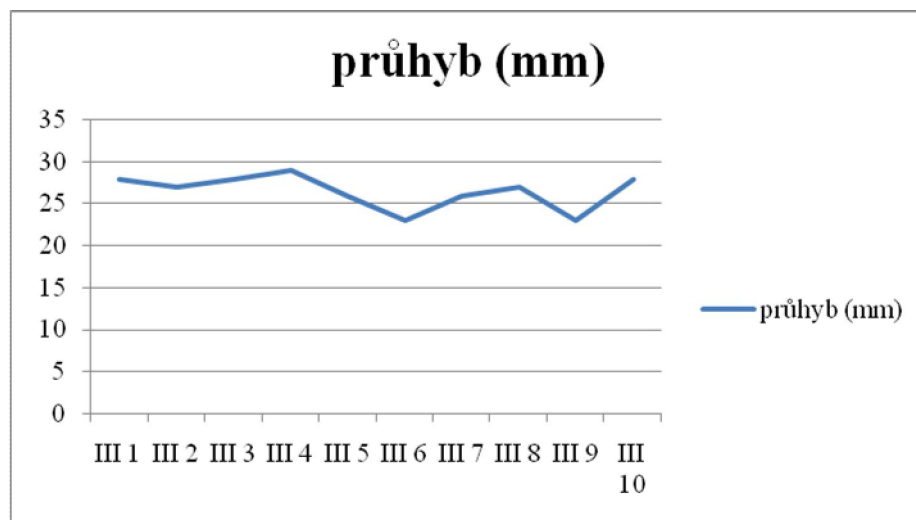
Osa y – napětí pevnosti v ohybu (MPa)



Osa x – použité vzorky

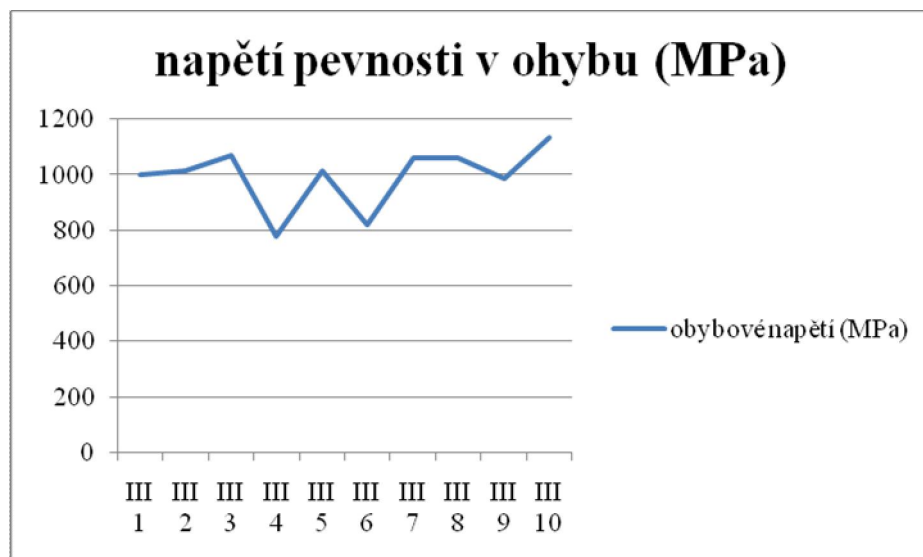
Osa y – modul (MPa)

III – Prepreg



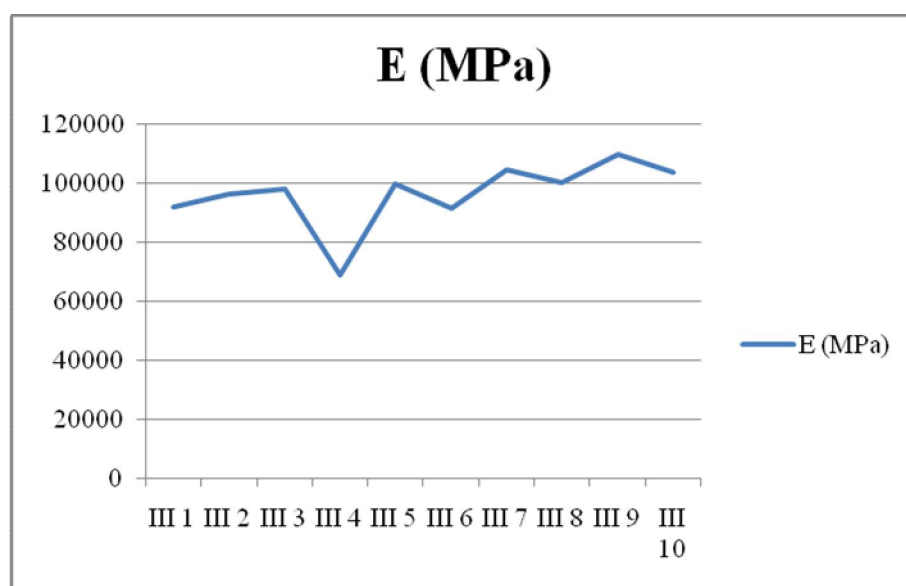
Osa x – použité vzorky

Osa y – průhyb (mm)



Osa x – použité vzorky

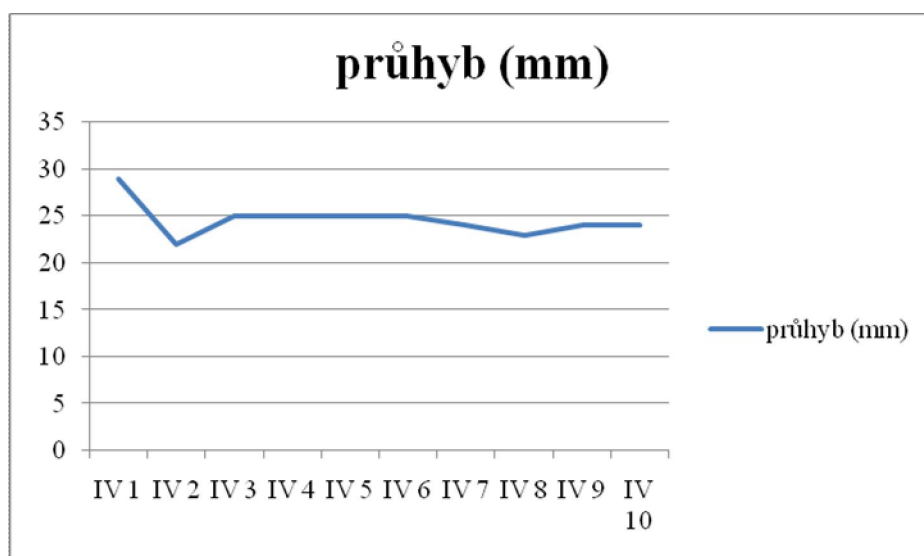
Osa y – napětí pevnosti v ohybu (MPa)



Osa x – použité vzorky

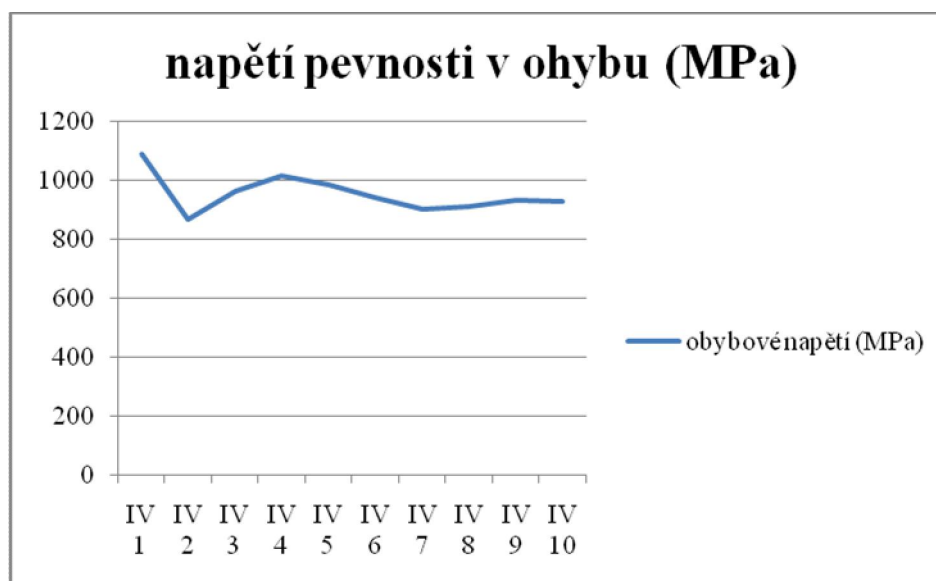
Osa y – modul (MPa)

IV - Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)



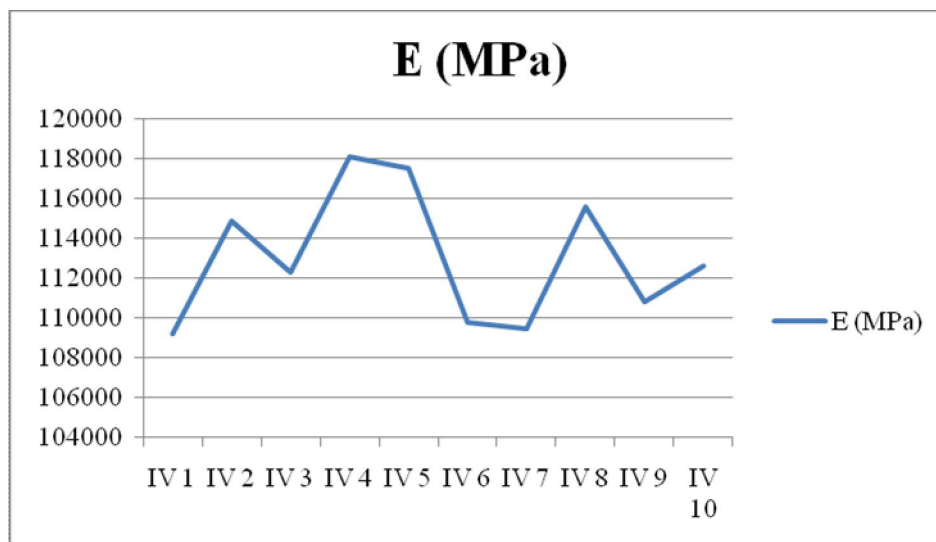
Osa x – použité vzorky

Osa y – průhyb (mm)



Osa x – použité vzorky

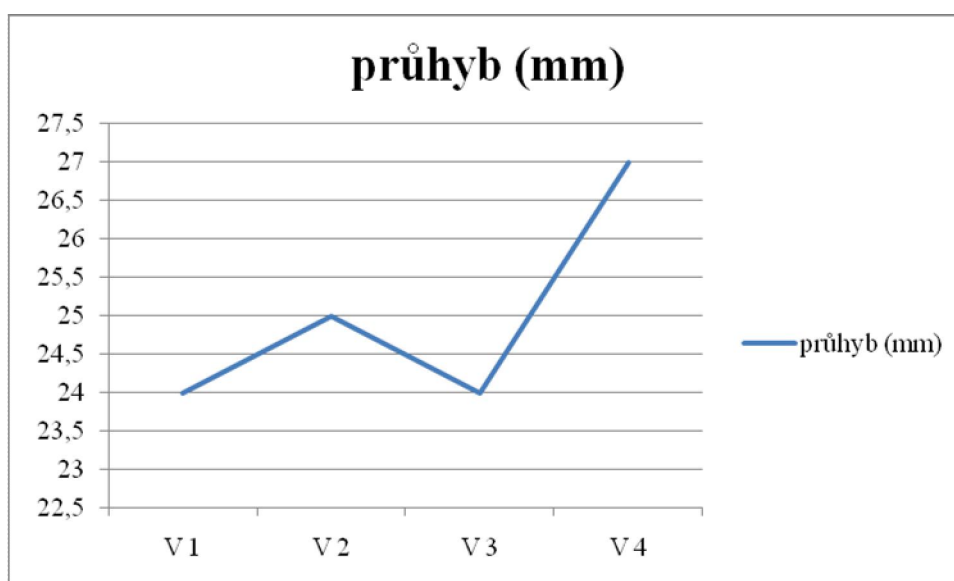
Osa y – napětí pevnosti v ohybu (MPa)



Osa x – použité vzorky

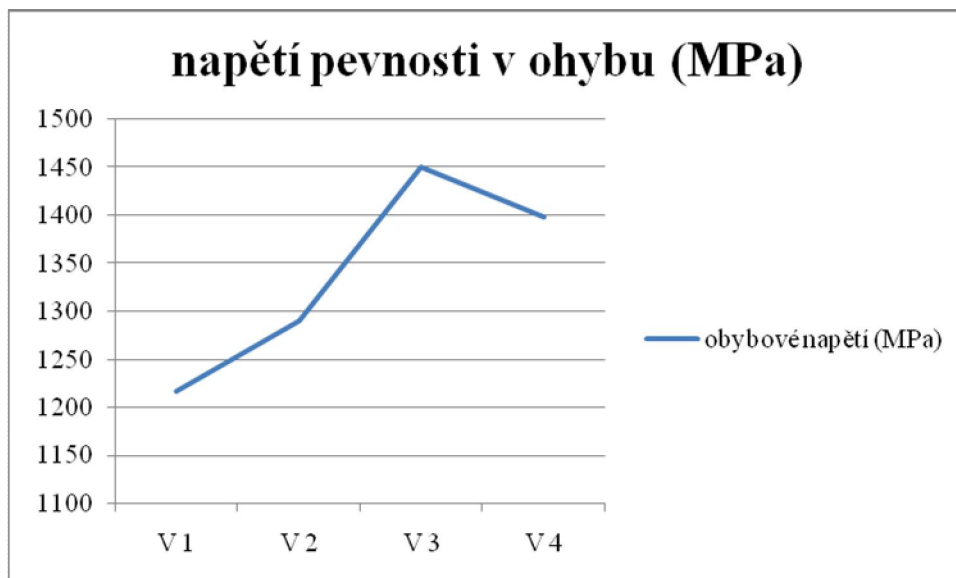
Osa y – modul (MPa)

V – Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)



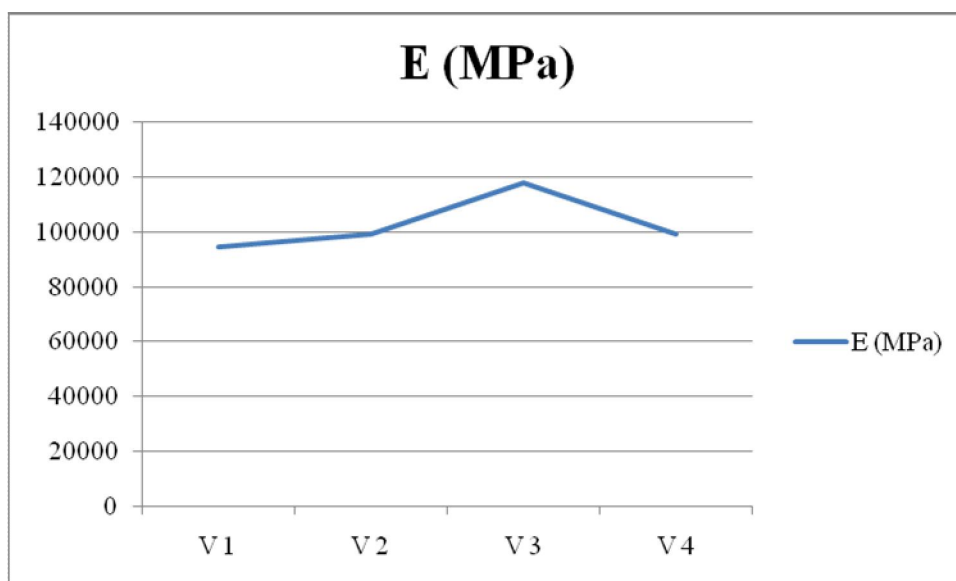
Osa x – použité vzorky

Osa y – průhyb (mm)



Osa x – použité vzorky

Osa y – napětí pevnosti v ohybu (MPa)



Osa x – použité vzorky

Osa y – modul (MPa)

Diskuze výsledků

V rozboru bylo zkoumáno a hodnoceno 5 různých typů materiálu, 3 nové materiály (jednosměrná uhlíková tkanina Epo, HexFly Prepreg M10, Marske carbon) a 2 stávající materiály (uhlíkový roving Torayca SC 700 a jednosměrná tkanina HexForce 42165900). Rozhodujícím hodnotícím kritériem byla pevnost v ohybu z důvodů zatížení pásnic a druhým nejdůležitějším hodnotícím kritériem byla tuhost materiálu.

U vybraných vzorků byly dále provedeny statistické výpočty a porovnání podle aritmetického průměru, směrodatné odchylky a variačního koeficientu. Hodnota síly F je uvedena pro zdokumentování zkoušky.

Kritéria výběru vzorků

Z celkového počtu pěti vzorků se ve dvou případech jednalo o v současné době nejpoužívanější kompozitní materiál (materiál č.II a materiál č.IV). S nimi byly dále testovány tři vzorky nových materiálů, u kterých se předpokládaly následující vlastnosti:

- Materiál I. – Nižších provozních náklady, lepší hodnoty pevnosti.
- Materiál č. III. – Výrazné snížení náročnosti výrobního postupu, vyšší cena.
- Materiál č.IV. – Mimořádně velká pevnost při tomu odpovídající ceně suroviny, předpokládaná vhodnost pro speciální aplikace.

Průměrná hodnota sady F , y , σ_0 , E

Materiálová skupina	F (N)	y (mm)	σ_0 (MPa)	E (MPa)
I	949	27,8	723,2	66750
II	1348	25,2	851,6	76114
III	1197	26,5	994,4	96509
IV	960	24,6	956,6	113014
V	2980	25	1338,8	102787



Směrodatná odchylka

Materiálová skupina	F (N)	y (mm)	σ_0 (MPa)	E (MPa)
I	128,44	4,61	81,00	9382,98
II	104,11	2,14	96,94	6883
III	129,44	2,06	110,72	11223,28
IV	72,26	1,83	63,22	3307,23
V	162,48	1,41	105	10276,15

Variační koeficient

Materiálová skupina	F (N)	y (mm)	σ_0 (MPa)	E (MPa)
I	13,5	16,5	11,2	14
II	7,7	8,5	11,3	9
III	10,8	7,7	11,1	11,6
IV	7,5	7,4	6,6	2,9
V	5,4	6,6	7,8	9,9

Průměrná hodnota sady hmotnostního a objemového podílu

Materiálová skupina	Hmotnostní podíl výztuže M_f	Hmotnostní podíl matrice M_m	Objemový podíl výztuže V_f	Objemový podíl matrice V_m
I	56,9	41,9	49,4	50,6
II	58,5	41,5	48,2	51,8
III	67,6	32,4	58,2	41,8
IV	55,7	44,3	45,7	54,3

Směrodatná odchylka

Materiálová skupina	Hmotnostní podíl výztuže M_f	Hmotnostní podíl matrice M_m	Objemový podíl výztuže V_f	Objemový podíl matrice V_m
I	3,60	2,99	2,63	2,63
II	2,54	2,54	2,14	2,14
III	1,71	1,71	1,31	1,31
IV	1,15	1,15	1,15	1,15

Variační koeficient

Materiálová skupina	Hmotnostní podíl výztuže M_f	Hmotnostní podíl matrice M_m	Objemový podíl výztuže V_f	Objemový podíl matrice V_m
I	6,32	7,13	5,32	5,19
II	4,34	6,12	4,43	4,13
III	2,52	5,27	2,25	3,13
IV	2,06	2,59	2,51	2,11

Hodnocení získaných výsledků

Pevnostní, technologické a ekonomické hodnocení získaných údajů je provedeno v rozmezí 1 až 5, kde hodnota 1 je brána jako nejlepší.

Pevnostní kritérium

Původní předpoklad výrazně lepších pevnostních vlastností u tří nových testovaných materiálů nebyl potvrzen. Získané hodnoty u zkoušky ohybem byly vyšší jak u v současné době používaných materiálů, rozdíl ale nedosahoval očekávaných hodnot.

Mezi naměřenými hodnotami a ostatními sledovanými parametry nebyla prokázána žádná závislost.



Technologické kritérium

V rámci technologického kritéria je zahrnuta i pracnost technologického postupu. Technologické kritérium vedle zmíněné pracnosti zahrnuje i hodnocení vlastností testovaných materiálů při výrobním procesu.

Získané hodnoty nepotvrdily předpoklady u vzorků nově používaných materiálů.

Ekonomické kritérium

V rámci ekonomického kritéria je zahrnuta finanční náročnost potřebného technologického zařízení a provozní náklady včetně cen surovin.

Vyhodnocení nepotvrdilo výhodnost záměny v současné době používaných materiálů za nové testované materiály.

V následující tabulce je uvedeno ekonomické hodnocení v běžně dodávané formě jednotlivých surovin. Protože uvedené hodnoty nejsou mezi sebou porovnatelné (různé jednotky), byl proveden jejich přepočet. Princip přepočtu spočívá ve vyčíslení nákladů potřebných k výrobě 1 tyčky kompozitu při tloušťce 5 mm a šířce 20 mm.

Materiálová skupina	Cena kompozitu 1 tyčky
I	56 Kč
II	35 Kč
III	247 Kč
IV	90 Kč
V	160 Kč

U každého z kritérií je u jednotlivých vzorků uvedeno dílčí pořadí, celkové pořadí při zohlednění výsledků hodnocení dle všech kritérií je uvedeno v posledním sloupci níže uvedené tabulky.

Materiálová skupina	Pevnostní hodnocení		Technologické hodnocení		Ekonomické hodnocení		Celkové pořadí
	σ_o (MPa)	Pořadí hodnocení	Čas (hod.)	Pořadí hodnocení	Cena v Kč bez DPH	Pořadí hodnocení	Pořadí
I	723,2	5	4	4 – 5	340,- Kč/m ²	2	5
II	851,6	4	2	1	1050,- Kč/kg	1	1
III	994,4	2 - 3	2,5	2 - 3	990,- Kč/m ²	5	4
IV	956,6	2 - 3	2,5	2 – 3	300,- Kč/m ²	3	2
V	1338,8	1	4	4 - 5	32,- Kč/m	4	3

Jako nejlépe vyšel uhlíkový materiál Roving TORAYCA SC 700 (materiál č.II - v současné době používaný), pouze za předpokladu akceptovatelnosti dosažených hodnot pevnosti v ohybu. V případě vyšších nároků na pevnost je možné použití materiálu HexForce 42165900 (materiál č.IV- v současné době používaný). Jedná se o jednosměrnou uhlíkovou tkaninu, která má oproti Rovingu (materiál č.IV- v současné době používaný) vyšší pevnost ohybu a hodnotu napětí o 105 MPa.

Srovnatelné hodnoty se stávajícími materiály byly zjištěny i u nového materiálu Prepreg (materiál č.III – nový materiál), jehož nevýhodou je vyšší pořizovací cena suroviny a nároky na její skladování. Pozitivní je u něj zjištěné výrazné zvýšení komfortu výroby. U marského carbonu (materiál č.V – nový materiál) bylo oproti jiným materiálům zjištěno zvýšení pevnosti o 30%. Opět nevýhoda je vyšší cena a pracnost výroby. Materiál jednosměrné uhlíkové tkaniny (materiál č.I – nový materiál) měl nejnižší hodnotu pevnosti a pracnosti. Pozitivní je u něj příznivá cena.

Srovnání nových materiálů oproti stávajícím

Na základě provedených experimentů a zkoušek byly zjištěny následující rozdíly v testovaných materiálech.



Staré materiály

Mezi hlavní negativa patří:

- u obou materiálů nižší pevnost v ohybu

Mezi hlavní pozitiva patří:

- zaběhlá výroba
- nižší cena surovin

Nové materiály

Mezi hlavní negativa patří:

- vyšší cena surovin
- u prepregu problematické skladování, kde je nutno chladících zařízení
- investice do pece, která umožňuje ohřev na 120°C, v současné době v TL-Ultralight je k dispozici pec, která umožňuje ohřev na 60°C
- použití materiálů na formy, které odolají těmto vysokým teplotám
- u marského carbonu a jednosměrná uhlíková tkanina Epo vyšší náročnost výroby

Mezi hlavní pozitiva patří:

- pouze v případě marského carbonu je patrné výrazné zvýšení pevnosti v ohybu.
- materiál HexPly Prepreg M10 na zvážení snadnost výroby, která je čistá, rychlá, bezproblémová, zkrácení času ohřevu pro vytvrzení.

Je nutné ale upozornit na to, že časová náročnost u výroby vzorků z nových materiálů může být do jisté míry neobjektivní vzhledem k tomu, že vzorky byly z těchto materiálů vyráběny poprvé, bez předchozích zkušeností a ručně. V případě zavedení výroby ve větším množství a optimalizaci výrobního postupu by bylo pravděpodobně možné časovou náročnost výroby významně snížit.



Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že zkoumané nové materiály nepředstavují za současných podmínek vhodnější variantu použití materiálů k výrobě ultralehkých letadel oproti stávajícím materiálům.

Prakticky ve všech případech přesáhl průhyb 1,5 tloušťky vzorku. V případě opakování zkoušky ohybem bych jako řešení doporučil menší vzdáleností podpěr u trhacího stroje. Ta by zajistila snížení hodnoty průhybu u zkoumaných vzorků. Provedení zkoušky by bylo vhodné v případě dalších experimentů dále doplnit o rozbor ovlivnění pórovitosti vzorku vzhledem k výrobnímu postupu a hlavně míře lidského faktoru, který, ale není součástí této práce.

Při realizaci experimentu byly vlastními silami prováděny následující činnosti:

- výroba formy
- výroba vzorků
- zkouška ohybem

Pro potřeby experimentu byly využity následující služby externích firem:

- Schempp-Hirth s.r.o.
- Vanessa Air spol. s.r.o.
- JKproduct



Závěr

Cílem této práce bylo vyrobit pásnice z různých materiálů, porovnat jejich vlastnosti vyhodnocením nejdůležitějších kritérií (pevnostní, technologické, ekonomické) a vybrat vhodné materiály umožňující dosažení snížení výrobních nákladů při současném zlepšení konstrukčních parametrů křídel.

Přestože podle vlastností uvedených v materiálových listech měly být nové materiály v porovnání se stávajícími výrazně lepší ve většině hledisek, výsledek provedených experimentů a měření tento předpoklad nepotvrdil. V případě zohlednění působení lidského faktoru při výrobě by nebyly dosaženy lepší hodnoty než jsou dosahované v současné době.



Přehled literatury a použitých zdrojů

Dad'ourek, Doc. Ing. Karel, CSc.: Kompozitní materiály – druhy a jejich užití, Liberec: Technická univerzita v Liberci 2007, 113 s. ISBN 978-80-7372-279-1

Dad'ourek, Doc. Ing. Karel, CSc.: Kompozitní materiály – modely a vlastnosti, Liberec: Technická univerzita v Liberci 2005, 55 s. ISBN 80-7083-972-4

Mikula, Ing. Jan: Konstrukce a projektování letadel II, Praha 2004

Firemní materiály TL-ULtralight

Firemní materiály Ing. Miroslava Kábrta

Firemní materiály řady firem, vyrábějící kompozity



Seznam obrázků

Obrázek 1 - Výroba materiálu	13
Obrázek 2 – Výroba laminované vrstvy materiálu	13
Obrázek 3- Ruční laminace	14
Obrázek 4- Vlastnosti kompozitů	15
Obrázek 5 – Podíl polyesterových a epoxidových pryskyřic	18
Obrázek 6- Souhrn vlastností užitečných uhlíkových vláken a kompozitů.....	25
Obrázek 7- Aplikace uhlíkových vláken a kompozitů.....	25
Obrázek 8- Pevnost a modul pružnosti uhlíkových vláken světových výrobců..	26
Obrázek 9- Typy používaných pásnic.....	29
Obrázek 10- Podélníky.....	29
Obrázek 11- Příčný řez křídlem.....	30
Obrázek 12- kostra křídla letounu Fascination.....	32
Obrázek 13- kostra křídla letounu Lancair.....	32
Obrázek 14- statické schéma křídla Samba.....	33
Obrázek 15- Příčný řez křídla Samba	33
Obrázek 16- sestava křídla Samba.....	33
Obrázek 17- Vzorek křídla s potahem s 3D tkanin při maximálním zatížení	34
Obrázek 18- desky použité na výrobu formy	36
Obrázek 19- hliníkové tyče	36
Obrázek 20- rozměření tyčí před vrtáním	37
Obrázek 21- Proces separace separátorem Búfa - Oldopal-Trennpaste.....	38
Obrázek 22- Příprava formy před výrobou každého vzorku.....	39
Obrázek 23- Dodaný materiál (role)	41



Obrázek 24- Detail struktury (Epo UDO UD CS 200/300)	41
Obrázek 25- Výroba vzorku	42
Obrázek 26- Kompletace formy před pečením.....	43
Obrázek 27- Příprava sytícího stroje.....	45
Obrázek 28- Nanesený materiál.....	46
Obrázek 29- Úprava před zaformováním.....	46
Obrázek 30- Detaily zaformování.....	47
Obrázek 31- zkušební tkaninový prepreg.....	49
Obrázek 32- Výroba vzorku	49
Obrázek 33- Role prepregu	51
Obrázek 34- Výroba vzorku – nanášení materiálu	51
Obrázek 35- Výroba vzorku – přechování materiálu	52
Obrázek 36- Výroba vzorku – strhávání vrchní fólie	52
Obrázek 37- Připravené vzorky	53
Obrázek 38- Zaformování před pečením	53
Obrázek 39- Standartní uspořádání karbonových tkanin Hexcel®	54
Obrázek 40- Dodaný materiál (role)	55
Obrázek 41- prosycení	56
Obrázek 42- Nanesení strhávací fólie	57
Obrázek 43- Rozložení vatelínu	57
Obrázek 44- Příprava pro vakuování	58
Obrázek 45- Vakuování	58
Obrázek 46- Výroba pásnic ve firmě MARSKE AIRCRAFT CORP.	60
Obrázek 47- Sycení materiálu	61
Obrázek 48- Kladení materiálu.....	61



Obrázek 49- Zabalení materiálu	62
Obrázek 50- Zatížení zabaleného materiálu	62
Obrázek 51- Zafixování materiálu	63
Obrázek 52- připravené vzorky v jednotlivých sadách.....	68
Obrázek 53- Trhací stroj	70
Obrázek 54- Detail průhybu	70
Obrázek 55- Detail zatížení	71
Obrázek 56- Stupnice z které se hodnoty odečítaly	71
Obrázek 57- Praktický příklad přelomeného vzorku	72
Obrázek 58 - Průběh deformace vzorku při zatěžování a odlehčování	74



Seznam příloh

Příloha č. 1 - separátory

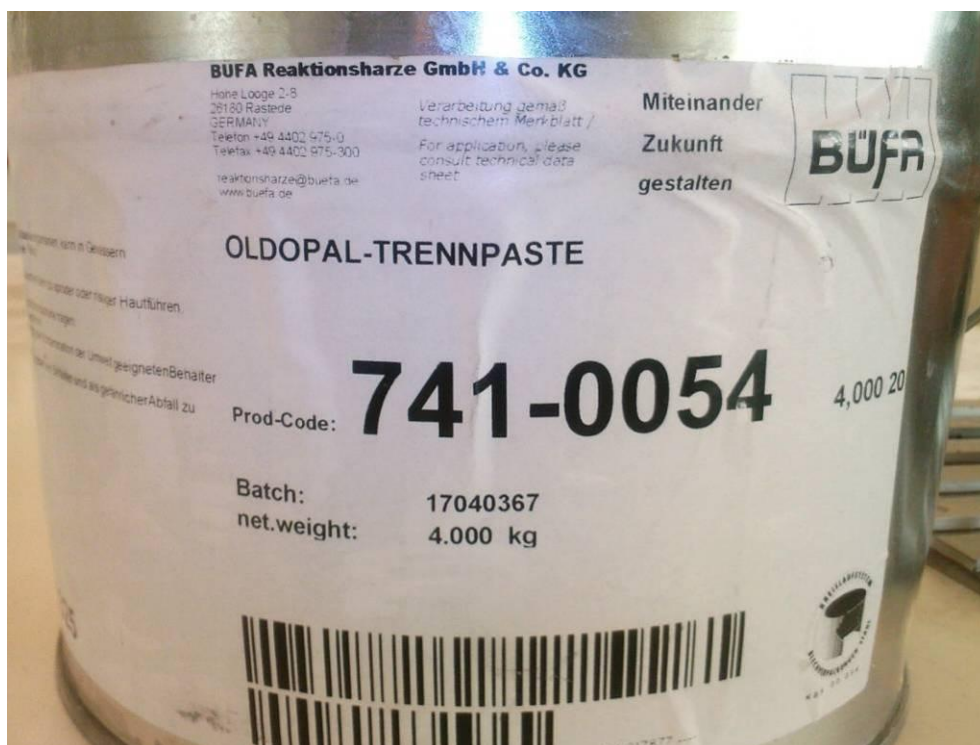
Příloha č. 2 - epoxidová pryskyřice

Příloha č. 3 - tužidlo

Příloha č. 4 - materiálové listy

Příloha č. 5 - makro řezy vzorků a lomů

Příloha č. 1 - separátory





Příloha č. 2 - epoxidová pryskyřice MGS LR 285

Velmi kvalitní pryskyřice pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Pryskyřice s tužidlem vytváří velmi viskózní směs a díky tomu jsou vlákna rychle a kvalitně prosycena. Díky tomu má výrobek podstatně nižší hmotnost a vyšší užitkovou hodnotu. Podrobnější návod na zpracování viz tech. listy MGS. Doporučená tužidla: H 500: poměr míchání 100:40 váhově nebo 100 : 50 objemově, doba zpracovatelnosti 100 g/25°C je cca 10 min. H 285: poměr míchání 100:40 váhově nebo 100:50 objemově, doba zpracovatelnosti 100 g/25°C je cca 50 min. K probarvování je možné použít pigmentové pasty do epoxidů. Certifikováno pro letecký průmysl - doklady jsou vždy k dispozici. Tužidla lze před vmícháním do pryskyřice, slévat a různě kombinovat a vytvořit si tak optimální dobu zpracovatelnosti pro daný výrobek



Laminating resin L 285
Hardeners 285, 286, 287

Résine L 285
Durcisseurs 285, 286, 287

Specifications

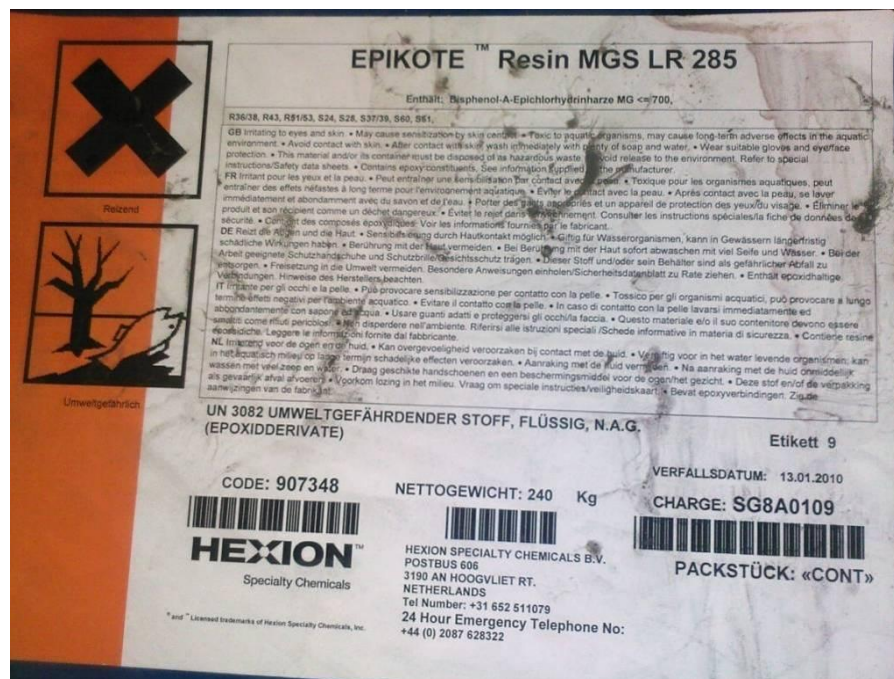
Spécifications

		Laminating resin L 285 <i>Résine L 285</i>
Density	lbs/gal / 77°F	9,85 - 10,26
<i>Densité</i>	<i>g/cm³ / 25°C</i>	1,18 - 1,23
Viscosity	cps / 77°F	600 - 900
<i>Viscosité</i>	<i>mPas / 25°C</i>	
Epoxide equivalent	—	165 - 170
<i>Equivalent époxy</i>		
Epoxide value	—	0,59 - 0,65
<i>Valeur EP</i>		
Colour	Gardner	max 3
<i>Coloration selon</i>		

		Hardener 285 <i>Durcisseur 285</i>	Hardener 286 <i>Durcisseur 286</i>	Hardener 287 <i>Durcisseur 287</i>
Density	lbs/gal / 77°F	7,84 - 8,10	7,84 - 8,10	7,76 - 8,00
<i>Densité</i>	<i>g/cm³ / 25°C</i>	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viscosity	cps / 77°F	50 - 100	60 - 100	80 - 100
<i>Viscosité</i>	<i>mPas / 25°C</i>			
Amine value	mg KOH / g	480 - 550	450 - 500	450 - 500
<i>Indice d'amine</i>				
Colour	Gardner	max 3(*)	max 3(*)	max 3(*)
<i>Coloration selon</i>				

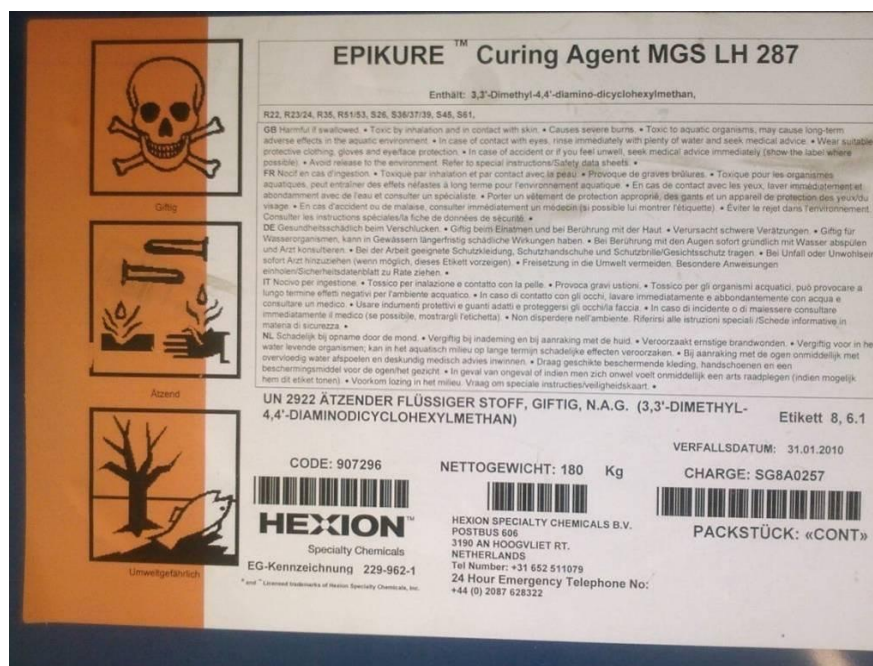
(*) Applies to transparent hardener only -
hardeners are coloured transparent blue

(*) Valable pour réglage incolore; les durcis-
seurs sont colorés bleu transparent



Příloha č. 3 - tužidlo

Tužidlo pro vytvrzování epoxidové pryskyřice 285. Poměr míchání je 100:40 /váhově/ 100:50 /objemově/ Doba zpracovatelnosti 100 g / 20 C 4 h. Podrobnější návod na zpracování viz tech. listy MGS.



Příloha č. 4- materiálové listy

Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300)

UDO® | Stabilized unidirectionals and multidirectionals for Plastics Reinforcement

ROVINGS	WEIGHT g/m ²	LINEAR DENSITY tex	THICKNESS mm	SCRIM BONDING	UDO®-STYLE
Carbon-UD	50	800	0,20	2	CS 50
	80	800	0,16	1	CST 80
	100	800	0,19	1	CST 100
	125	800	0,21	1	CST 125
	150	800	0,22	1	CST 150
	200	800-3600	0,40	1	CST 200
	250	800-3600	0,30	2	CS 200
	250	800-3600	0,36	1	CST 250
	250	800-3600	0,40	2	CS 250
	300	800-3600	0,38	1	CST 300
	300	800-3600	0,42	2	CS 300
	500	1600-3600	0,66	2	CS 500
	600	1600-3600	0,75	2	CS 600
Carbon Multidirectionals +/- 45°	100	800	0,25	2	MX CS 100
	160	800	0,29	1	MX CST 160
	200	800	0,36	1	MX CST 200
	250	800	0,45	1	MX CST 250
	300	800	0,55	1	MX CST 300
	400	800-3600	0,65	1	MX CST 400
E-Glass-UD	250	800-1200	0,27	1	EST 250
	300	800-1200	0,30	1	EST 300
	500	1200-2400	0,50	2	ES 500
	600	1200-2400	0,54	2	ES 600
R-Glass-UD	220	1600	0,32	2	RS 220
S2-Glass-UD	220	1600	0,32	2	SS 220
Aramid-UD	200	805	0,36	2	AS 200
	300	805	0,54	2	AS 300

This information is given in good faith but without warranty. February 2006

C = Carbon HT / HM / UHM

A = Aramid

E = E Glass

R = R Glass

S = S Glass

Carbon-UD

Width: 300 mm, 600 mm

Roll length: 250 lm

Carbon-MX

Width: 420 – 1270 mm

Roll length: 50 lm

Other widths and lengths on request

Carbon-UD Tape

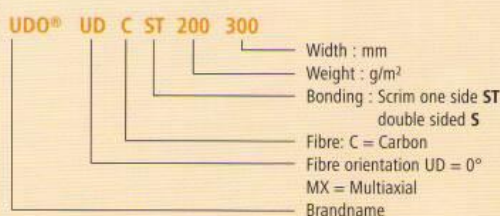
Weight: 80 g/m² – 600 g/m²

Width: from 39 mm

Roll length: 250 lm

Fabrication acc.: DIN EN ISO 9001:2000

Product designation



Storage: Store Udo in dry rooms at moderate temperature.

Safety: In some cases, skin-irritations might occur, however, mostly for a short time. In these cases, it may be advisable to wear gloves and glasses.

Disposal: The fibre products must be disposed of in the same way as non-hazardous industrial waste in an authorised waste disposal facility and in compliance with local regulations.

Conductivity: Carbon fibres, abraded particles and fibre dust are electrically conductive and may cause short-circuits in electrical installations.

Protective measures acc. to IP 54 (DIN 40058 B 18, VDE 0100 and VDE 0660).



Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700)

Quality Carbon Fibre

Commercial documentation – N°AQ.866 - 9 - Date: September 2003

TORAYCA®

TYPE OF CARBON FIBRE

T700S

Item	Property	Unit	Filaments	Nominal Value
TORAYCA® Yarn Properties	Tensile Strength	MPa (kgf/mm ²)		4900 (500)
	Tensile Modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		230 (23.5)
	Elongation	%		2.1
	Density	g/cm ³		1.80
	Yield	tex(g/1000m) tex(g/1000m)	12000 24000	800 1650
	Specific Heat	cal/g.°C		0.18
	Volume Resistivity	x10 ⁻⁹ Ω.cm		1.6
Composite Property (Resin System: 2500) (Measured Temp: RT)	0 ° Coef. of Thermal Expansion	x10 ⁻⁶ °C ⁻¹		-0.38
	0 ° Thermal Conductivity	cal/cm.s.°C		2.24 x 10 ⁻²
	Cross Sectional Area	mm ²	12000 24000	0.44 0.92
	Filament Diameter	µm		7
	0 ° Tensile Strength	MPa (kgf/mm ²)		2550 (260)
	Tensile Modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		135 (14.0)
	Elongation	%		1.7
	0 ° Compressive Strength	MPa (kgf/mm ²)		1470 (150)
	Compressive modulus	GPa (10 ³ kgf/mm ²)		127 (13.0)
	0 ° ILSS	MPa (kgf/mm ²)		90 (9)

SOFICAR

Sales Office

3 avenue du chemin de Presles

94 410 Saint Maurice Cedex - France

Tel : 33 (0)1 45 11 12 80

Fax : 33 (0)1 48 85 62 92

E-mail : info@soficar-carbon.com

SOFICAR

Head Office & plant

Route de Lagor

64 150 Abidos - France

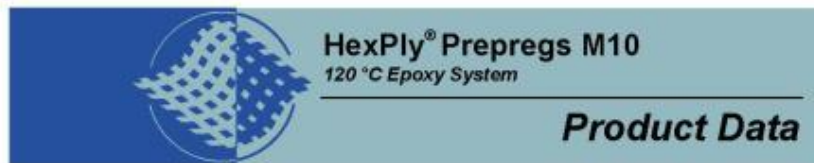
Tel : 33 (0)5 59 60 71 00

Fax : 33 (0)5 59 60 71 10

E-mail : info@soficar-carbon.com



Prepreg (HexPly M10)



Description

Epoxy / HS carbon single tow

HexPly® SC/M10/30%/1X12K/HR

(Resin / Resin content by weight / Reinforcement reference)

Prepreg :

Nominal weight : 1.2 g/ml
Resin density : 1.20 g/cm³
Shelf life at 23 ± 2 °C : 60 days

Reinforcement :

Nominal weight : 0.8 g/ml
Structure :
Fibre density : 1.80 g/cm³
Fibre : High strength
carbon
12000 filaments

Processing

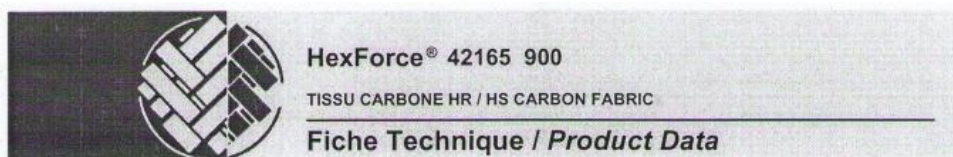
Cure cycle : from 16 h/85 °C to 10 min/150 °C
Pressure : 0.3 to 3 bar

Storage and handling

Guaranteed storage shelf life : 18 months at -18 °C
Store the product in the original sealed packaging or after partial use, in an impervious package.
Do not unwind before warming up to room temperature to prevent condensation.



Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)



Renfort Textile pour Composites Hautes Performances

Textile Reinforcement for High Performance Composites

DEFINITION / DESCRIPTION

Edition 10/2007 / Issue 10/2007

Type de fils Type of yarns	Chaîne / Warp : 3K HR Trame / Weft : EC5 5.5 X 2
Masse nominale / Nominal weight	168 g/m ² 4,96 oz/sqy ²
Armure Weave style	TAFFETAS PLAIN
Poudrage Powdering	
Traitement Finish	
Largeur standard Standard width	900 mm 35 in

CARACTERISTIQUES / CHARACTERISTICS

Contexture nominale Nominal construction	Chaîne / Warp : 8,2 fils-yarns/cm Trame / Weft : 4 coups-picks/cm
Répartition en masse Weight distribution	Chaîne / Warp : 98 % Trame / Weft : 2 %
Epaisseur / Thickness (*)	0,17 mm

PROPRIETE MECANIQUE SUR STRATIFIE* / MECHANICAL PROPERTIES ON LAMINATE*

Mise en oeuvre (60 min à 120°C, vide 0,85 bar, pression 3 bars) / Cure cycle (60 min at 120°C, vacuum 0,85 bar, pressure 3 bars)

	Traction chaîne Warp tensile	Flexion chaîne Warp flexural	C.I.L. chaîne Warp I.L.S.S.
Contrainte / Strength (Mpa)			
Module / Modulus (Gpa)			
Normes / Standards			

**Nota: Les valeurs moyennes ci-dessus sont obtenues sur la base d'un stratifié epoxy de mm avec % de fibres en volume.
*NB : The above average values are obtained with epoxy laminate of mm at % of fibres in volume.

IMPORTANT

Les renseignements contenus dans la présente fiche produit sont fondés sur nos connaissances actuelles et sur les résultats d'essais effectués avec un constant souci d'objectivité. Ils doivent être adaptés à chaque cas particulier. Les performances du produit après utilisation étant liées aux conditions particulières de mise en œuvre, elles ne sauraient engager notre responsabilité.

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.



For European sales office telephone numbers
and a full address list please go to :
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

© Copyright Hexcel



Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)

PROPERTIES		
Tensile Strength	350,000 psi	(2414 MPa)
Tensile Modulus	20.5 msi	(141 gpa)
Compressive Strength	280,000 psi	(1931 MPa)
Compressive Modulus	20.0 msi	(138 gpa)
Ultimate Tensile Strain	0.017	
Coefficient of Expansion	-.0000001 in/deg F	(-.2ppm / deg C)
Fiber Volume	67% (+/- 1%)	
Diameter Tolerance	+/- 5%	
Glass Transition Temp	212 deg F (100 deg C)	
Special Request	320 deg F (160 deg C)	
Matrix Material	BIS F Epoxy	
Modulus	34 msi	(235 gpa)
Tensile Strength	700,000 psi	(4828 MPa)

Příloha č. 5 - makro řezy vzorků a lomů

Jednosměrná uhlíková tkanina (Epo UDO UD CS 200/300)

Řez zkušebního vzorku



Lomy zkušebního vzorku







Uhlíkové rovingy (TORAYCA SC 700)

Řez zkušebního vzorku



Lomy zkušebního vzorku



Prepreg (HexPly M10)

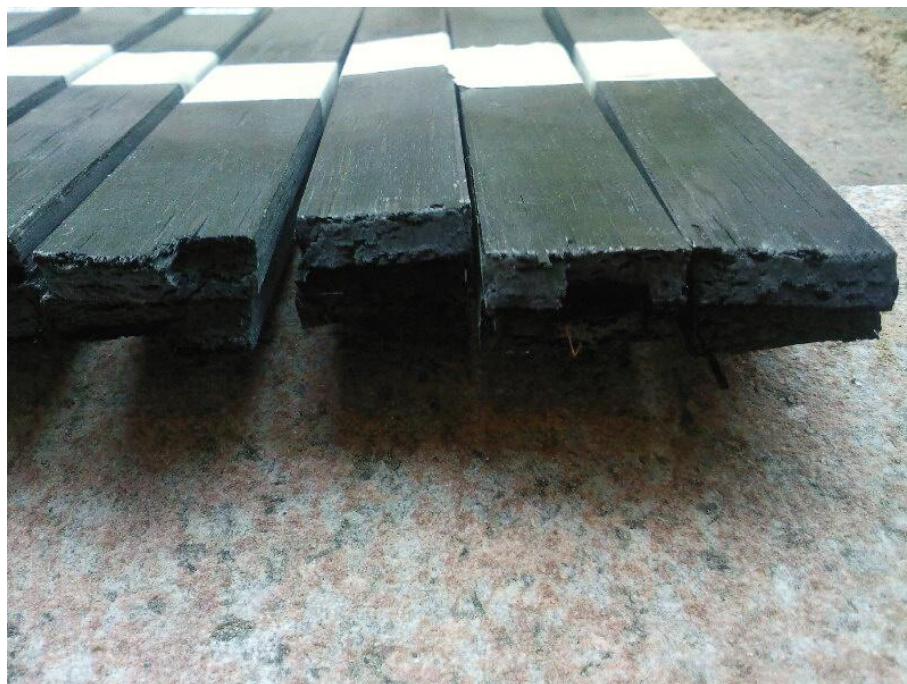
Řez zkušebního vzorku



Lomy zkušebního vzorku





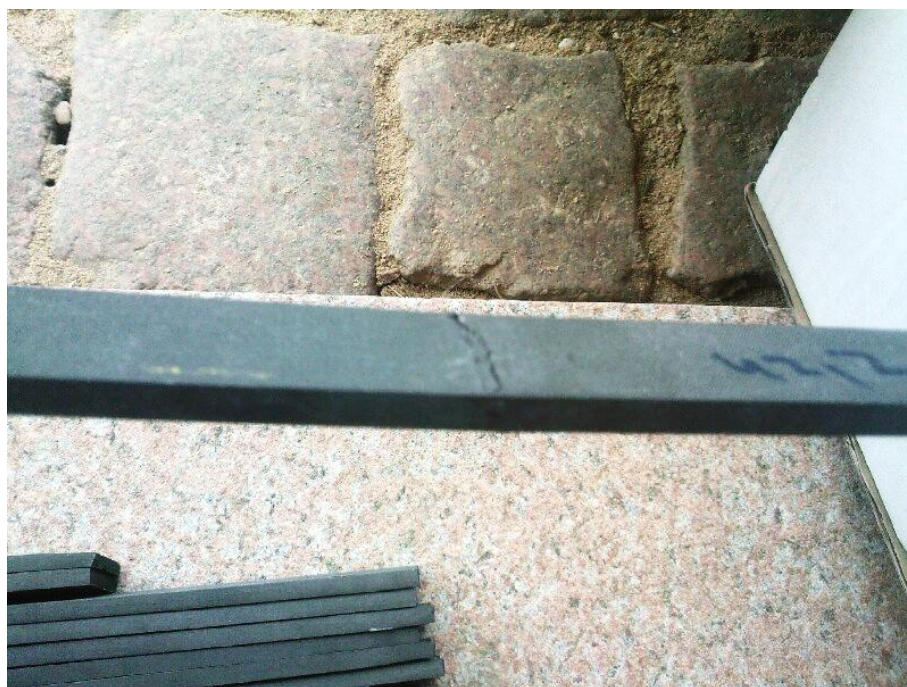


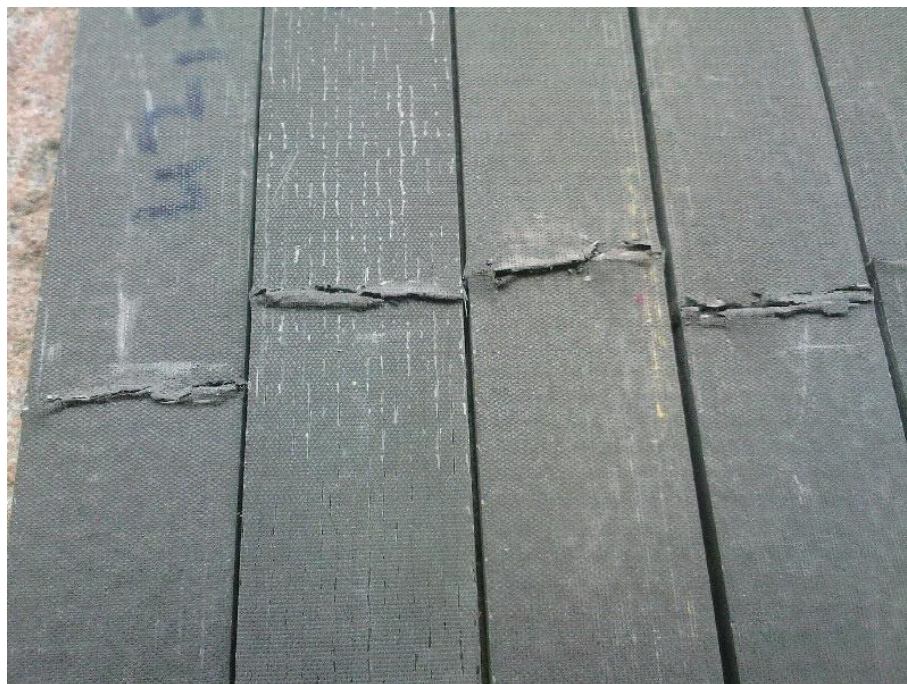
Jednosměrná tkanina (HexForce 42165900)

Řez zkušebního vzorku



Lomy zkušebního vzorku





Marske carbon (GRAPHLITE carbon rod)

Řez zkušebního vzorku



Lomy zkušebního vzorku









Prohlášení o využívání výsledků diplomové práce

Jsem si vědom toho, že diplomová práce je majetkem školy, a že s ní nemohu sám bez svolení školy disponovat, a že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po 5 letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TU v Liberci, kde je uložena.

Jméno: Jan Kieslich

Adresa: Na Ohradě 241/14a, Hradec Králové, 50003

Podpis: